

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Elements i dispositius aerodinàmics en la
Fórmula 1. L'aleró davanter.**

MEMÒRIA

Autor: Arnau Gabarró Martin

Director: Enric Trillas Gay

Convocatòria: Juny 2016



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Fonamentalment aquest treball es divideix en dues parts. En la primera part s'estudia l'aerodinàmica dels components més importants que actualment incorpora un monoplaça de la Fórmula 1, fent especial èmfasi en l'aleró davanter.

En la segona part del treball es dissenya un aleró davanter amb el programari CAD *Solidworks*. A partir d'aquest model inicial es realitzen diverses modificacions en la seva geometria i es simulen tots els models mitjançant el software CFD *ANSYS Fluent*. Finalment es discuteixen els resultats obtinguts en les simulacions i es realitza una comparativa entre els diferents models per tal d'acabar escollint aquell que presenti una major eficiència aerodinàmica.

ÍNDEX

Resum	2
Índex de figures	5
1. Prefaci	7
1.1 Origen del projecte	7
1.2 Motivació	7
2. Introducció	8
2.1 Objectius del projecte	8
2.2 Abast del projecte	9
3. Conceptes previs de la mecànica de fluids	10
3.1 Capa límit	10
3.2 Principis de la mecànica de fluids	11
3.2.1 Principi de Bernouilli	11
3.2.2 Efecte Venturi	12
3.3 Forces aerodinàmiques	12
4. Elements aerodinàmics d'un monoplaça de la Fórmula 1	15
4.1 Alerons	15
4.1.1 Estudi del perfil bàsic d'un aleró	15
4.1.2 El flap de Gurney	18
4.1.3 Aleró de més d'un element	19
4.1.4 Resistència induïda i resistència paràsit	20
4.1.5 Aleró davanter	21
4.1.6 Aleró posterior	24
4.2 Fons pla	26
4.3 Difusor	28

4.4	Pontons	29
4.5	Deflectors laterals	30
5.	Disseny assistit per ordinador (CAD) i dinàmica computacional de fluids (CFD) ..	32
5.1	Creació de la geometria.....	32
5.1.1	Disseny CAD	32
5.1.2	Creació de la geometria en l'ANSYS FLUENT.....	35
5.2	Mallat.....	36
5.3	Solution setup.....	39
5.4	Anàlisi dels resultats	42
5.4.1	Model 0 °	42
5.4.2	Model 0° amb <i>endplate</i> en el flap.....	47
5.4.3	Model 2,5 °	52
5.4.4	Model 5 °	55
5.4.5	Model 7,5 °	58
5.4.6	Model 10 °	61
6.	Comparativa dels resultats numèrics obtinguts	65
7.	Planificació temporal i costos.....	67
8.	Impacte mediambiental.....	70
	Conclusions	71
	Comentaris generals.....	72
	Bibliografia	73

Índex de figures

Figura 3.1 [1]: <http://www.textoscientificos.com/fisica/fluidos/flujos-en-capa-limite>

Figura 3.2 [2]: <https://www.youtube.com/watch?v=OT0ynzPtoVE>

Figura 3.3 [3]: https://www.mpoweruk.com/figs/flight_theory.htm

Figura 3.4 [4]: https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Venturi

Figura 3.5 [5]: <http://avstop.com/ac/flighttraininghandbook/forcesonanaairfoil.html>

Figura 3.6 [6]: <http://www.up22.com/Aerodynamics.htm>

Figura 4.1[7]:

http://www.sites.upiicsa.ipn.mx/polilibros/portal/polilibros/P_proceso/Transporte_Aereo/documentos/PE-4.htm

Figura 4.2[8]: www.vivaf1.com

Figura 4.5 [9]: <http://www.motor.es/formula-1/el-flap-gurney-sencillo-pero-muy-efectivo-201521169.html>

Figura 4.6 [10]: <http://www.formulaf1.es/18615/flaps-sobre-el-difusor/>

Figura 4.7 [11]: <http://www.motor.es/formula-1/el-flap-gurney-sencillo-pero-muy-efectivo-201521169.html>

Figura 4.9 [12]: <http://www.skysports.com/f1/news/32420/9928148/how-red-bull-have-found-their-wings-again-in-2015>

Figura 4.10 [13]: <http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV13.html>

Figura 4.11 [14]: <http://www.s2ki.com/s2000/topic/613484-voltex-vs-js-racing/>

Figura 4.12 [15]: <http://www.caranddriverthef1.com/formula1/blogs/angelesf1/las-placas-terminales-endplate-el-domador-vortices>

Figura 4.13 [16]: <http://www.s2ki.com/s2000/topic/613484-voltex-vs-js-racing/>

Figura 4.14 [17]: <http://www.caranddriverthef1.com/formula1/blogs/angelesf1/las-placas-terminales-endplate-el-domador-vortices>

Figura 4.15 [18]:

https://m.reddit.com/r/formula1/comments/3xubt0/forget_drs_meet_tard_turbulent_air_reduction/

Figura 4.16 [19]: <http://www.formulaf1.es/26257/comprendiendo-un-f1-parte-3/>

Figura 4.17 [20]: <http://camaroonf1.com/tecnicas/la-importancia-de-la-aerodinamica-en-la-f1-2da-parte-los-alerones/>

Figura 4.18 [21]: <http://www.formulaf1.es/13523/la-estela-del-mclaren-mp4-26/>

Figura 4.19 [22]: <http://www.taringa.net/posts/autos-motos/12634136/Formula-1-funcionamiento-del-DRS-y-Kers.html>

Figura 4.20 [23]: <http://angelesenlacabeza.blogspot.com.es/2013/08/por-que-corren-tanto-los-f1-efecto-suelo.html>

Figura 4.21 [24]: <http://www.f1enestadopuro.com/en-2017-vuelve-a-la-formula-1-el-efecto-suelo.html>

Figura 4.22 [25]: <https://truzonef1.wordpress.com/el-difusor/>

Figura 4.23 [26]: <http://www.foro-efectomotor.com/index.php?topic=85.0>

Figura 4.25 [27]: <http://formulauno-auto.blogspot.com.es/2013/11/deflectores-laterales-de-los-f1.html>

1. Prefaci

1.1 Origen del projecte

La història de la Fórmula 1 és tant llarga com diversa. Els seus començaments es remunten a la França de l'any 1894, on s'organitzaven simples carreres per camins que portaven d'un poble a un altre.

Des dels seus inicis, aquesta competició automobilística ha estat en constant canvi, tant en referència a les regulacions de la FIA (*Federation Internationale de l'automobile*) com en el disseny i la tecnologia dels vehicles. El fet és que la Fórmula 1 és molt més que un gran espectacle, és una font d'inspiració i de treball per molts enginyers que a través d'aquesta competició aporten el seu granet de sorra en l'avanç tecnològic i mecànic.

1.2 Motivació

Al llarg dels anys s'ha vist com les escuderies de la Fórmula 1 variaven les tecnologies i la geometria dels seus monoplaques per tal d'aconseguir ser els més ràpids. El que no sap tothom són els grans estudis que l'aerodinàmica d'un monoplaça de la F1 comporta, i la seva dificultat.

L'elecció del tema d'aquest treball de fi de grau sorgeix de la inquietud de saber més sobre el món de l'automoció de competició i entendre des del punt de vista de l'enginyer la funcionalitat de cadascun dels components d'un monoplaça de la Fórmula 1.

2. Introducció

2.1 Objectius del projecte

El primer objectiu que s'ha plantejat per aquest treball és el de conèixer més a fons la funcionalitat dels diversos elements que incorpora un monoplaça de la Fórmula 1 a nivell aerodinàmic.

El segon objectiu és aplicar els coneixements adquirits en l'assignatura Mecànica de Fluids per poder comprendre el comportament que adopta l'aire en cadascun d'aquests elements i els conceptes i les hipòtesis que s'apliquen a l'hora de dissenyar-los.

L'últim objectiu i el més important és el d'analitzar l'aerodinàmica de l'aleró davanter d'un Fórmula 1. Per dur a terme aquest estudi es seguiran els següents passos:

- Analitzar aerodinàmicament l'aleró davanter d'un F1 actual.
- Dur a terme modificacions en la seva geometria tal com variacions en l'angle d'atac del perfil alar, analitzar-les i extreure les conclusions pertinents dels resultats obtinguts.

Per dur a terme els canvis de geometria en el model es farà servir el software CAD (*Computer Aided Design*) anomenat *Solidworks*. L'anàlisi es durà a terme amb el software CFD (*Computational Fluid Dynamics*) anomenat *ANSYS Fluent*. Per tant, una part dels objectius serà també la de familiaritzar-se amb el software *ANSYS Fluent*, programa amb el que no s'ha aprofundit prou durant el grau.

En el cas del software CAD s'ha decidit utilitzar el *Solidworks* i no una altra alternativa com per exemple el *CATIA* ja que en el grau es va impartir una assignatura anomenada *Expressió Gràfica* en la qual s'ensenyava molt detalladament com manipular aquest programa. Per tant la decisió ha estat presa tenint en compte la diferència de coneixements entre els dos programaris.

2.2 Abast del projecte

Primerament es farà una introducció als conceptes més bàsics de la Mecànica de Fluids, ja que posteriorment la majoria d'aquests conceptes s'utilitzaran en l'anàlisi aerodinàmic de l'aleró davanter. Després es presentaran els elements aerodinàmics més importants que conformen un monoplaça de la Fórmula 1 tot fent una petita introducció i estudi de cadascun d'ells. S'aprofundirà més en l'apartat dels alerons i sobretot especialment en l'aleró davanter, ja que aquest serà posteriorment l'objecte d'estudi. Finalment es dissenyarà un aleró davanter i es duran a terme una sèrie de modificacions en la seva geometria. Es simularan els diferents models i es discutiran els resultats obtinguts.

3. Conceptes previs de la mecànica de fluids

En aquest apartat s'explicaran alguns conceptes bàsics de la mecànica de fluids, la major part dels quals s'aplicaran més endavant per analitzar l'aleró davanter d'un Fórmula 1.

3.1 Capa límit

Dintre del comportament d'un fluid en contacte amb un cos, la capa límit és aquella zona de fluid pertorbat que va des de la superfície del cos on la velocitat és 0 (degut al no lliscament) fins allà on la velocitat és quasi bé la del fluid NO pertorbat. Val a dir que els efectes viscosos del fluid queden confinats en la capa límit. En la següent figura (Figura 3.1) es mostra una representació esquemàtica del gradient de velocitats en la capa límit.

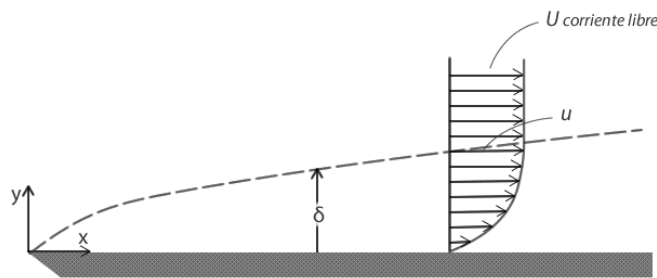


Figura 3.1: Representació esquemàtica del gradient de velocitats en la capa límit. [1]

Quan hi ha un **despreniment de la capa límit** la geometria del flux esdevé irregular, provocant turbulències i gradients de pressió molt alts en la zona posterior del despreniment. Com a exemple il·lustratiu, en la següent imatge (Figura 3.2) podem observar just la zona on es produeix el despreniment de la capa límit en l'ala d'un avió, donant pas a una zona de turbulències que es reflexa en el moviment aleatori dels cordills enganxats a l'ala.

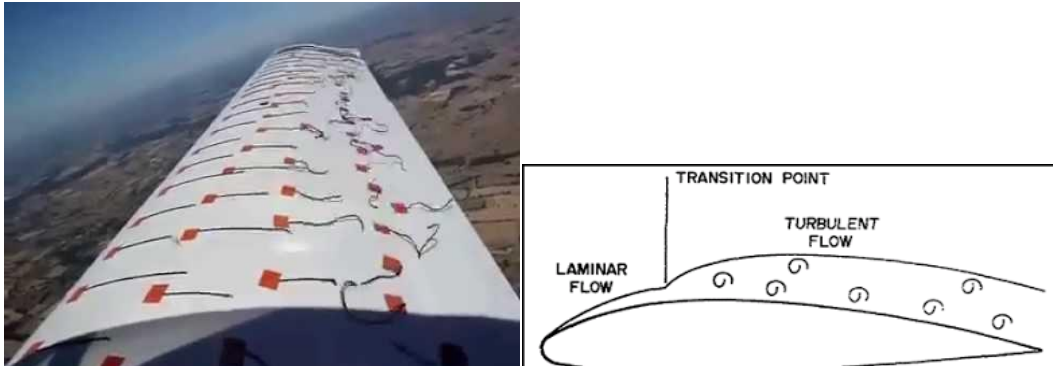


Figura 3.2: Despreniment de la capa límit. [2]

3.2 Principis de la mecànica de fluids

3.2.1 Principi de Bernouilli

El principi de Bernouilli parteix del principi de la conservació de l'energia, i ens diu que la pressió estàtica, més la pressió dinàmica, més l'alçada del fluid en el punt 1, més el treball mecànic de bombes o ventiladors és igual a la pressió estàtica, més la pressió dinàmica, més l'alçada del fluid en el punt 2, més unes pèrdues degudes a la fricció i a elements singulars.

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 + H_m = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2 + h_f$$

Si no tenim en compte les pèrdues degudes a la fricció i el treball extern aportat per altres elements ens queda la següent expressió:

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2 = \text{constant}$$

Aquesta és l'expressió que ens interessa per realitzar l'anàlisi aerodinàmic d'un cos, ja que ens diu que en dos punts d'un fluid d'estudi (tot considerant nul·la la seva diferència de cotes), quan augmenta la pressió del fluid, la velocitat disminueix, i viceversa. Aquest concepte és aplicat en el comportament aerodinàmic dels objectes,

com per exemple pot ser l'ala d'avió o al d'un aleró. En el cas d'una ala d'avió, l'aire que circula per la seva part superior ha de recórrer una distància major que l'aire que circula per la seva part inferior, cosa que provoca que tingui una velocitat superior que el que circula per la part inferior. Aquesta diferència de velocitats, pel principi de conservació de Bernoulli just presentat, provoca una diferència de pressions entre la part superior i inferior de l'ala que es tradueix en una força ascendent (*Lift*). En la *Figura 3.3* es pot observar representat el fenomen just descrit.

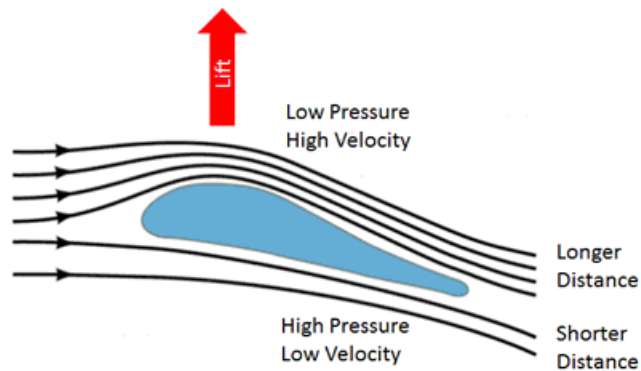


Figura 3.3: Principi de Bernoulli aplicat a l'ala d'un avió.[3]

3.2.2 Efecte Venturi

L'efecte Venturi ens diu que un fluid circulant per un conducte augmenta la seva velocitat si la secció del conducte disminueix. L'augment de la velocitat, pel principi de Bernoulli, provoca la disminució de la pressió en aquella zona. En la següent figura (*Figura 3.4*) veiem representat aquest fenomen en un tub de venturi.

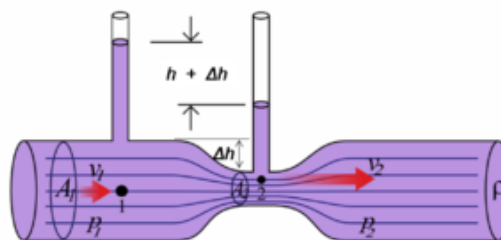


Figura 3.4: Efecte venturi.[4]

3.3 Forces aerodinàmiques

Quan un cos circula a través d'un fluid, es generen unes forces que es basen en els principis explicats en l'apartat anterior i que regiran el comportament aerodinàmic d'aquest cos.

Aquestes forces les dividirem en 2 : la força de resistència a l'avanç (*Drag*) i la força de sustentació (*Lift*).

La direcció de la força de la resistència d'avanç és sempre coincident amb la direcció d'entrada del fluid, i la força de sustentació és sempre perpendicular a la de resistència a l'avanç.

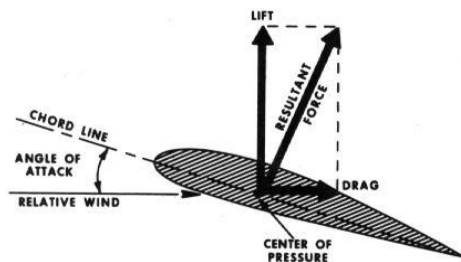


Figura 3.5: Forces de drag i de lift en una ala d'avió.[5]

En la *Figura 3.5* observem la descomposició de forces aerodinàmiques en el que podria ser l'ala d'un avió. Observem que en aquest cas la **força de sustentació** va cap amunt, ja que en un avió interessa que hi hagi una força de sustentació. En canvi, en un cotxe de Fórmula 1 interessa que aquesta força vagi cap avall, ja que d'aquesta manera s'augmenta l'adherència o *grip* del monoplaça al terra, cosa que serveix per poder agafar les revolts del circuit amb més rapidesa. Aquesta sustentació negativa també és anomenada càrrega aerodinàmica o en anglès, *Downforce*. En la *Figura 3.6* es representa el *Downforce* en un perfil típic d'aleró.

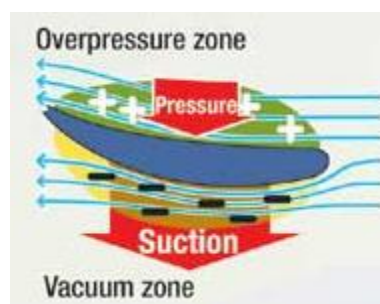


Figura 3.6: Downforce en un perfil d'aleró. [6]

La **força de resistència a l'avanç**, a més d'anar en la mateixa direcció d'entrada del fluid, també va en el mateix sentit. Això és així degut a que aquesta força és originada a partir de la fricció de les partícules del fluid amb el cos d'estudi.

Les expressions que regeixen aquestes dues forces són les següents:

$$\text{Força de resistència a l'avanç} \rightarrow F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_D \cdot v^2 \cdot C_D$$

$$\text{Força de sustentació} \rightarrow F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_L \cdot v^2 \cdot C_L$$

On:

ρ : Densitat del fluid (kg/m^3)

A_D : Àrea frontal (m^2)

A_L : Àrea superior (vista en planta) (m^2)

v : Velocitat el fluid (m/s)

C_D : Coeficient de resistència a l'avanç (drag)

C_L : Coeficient de sustentació (lift)

Per últim, definim l'**eficiència aerodinàmica** com el quocient entre el coeficient de sustentació (C_L) i el coeficient de resistència a l'avanç (C_D). En la Fórmula 1 interessa maximitzar la càrrega aerodinàmica i minimitzar la força de resistència a l'avanç, per tant interessa maximitzar l'eficiència aerodinàmica.

$$EA = \frac{C_L}{C_D}$$

On:

C_D : Coeficient de resistència a l'avanç (Drag)

C_L : Coeficient de sustentació (Lift)

4. Elements aerodinàmics d'un monoplaça de la Fórmula 1

En aquest apartat del treball s'explicarà la funció de diversos components aerodinàmics d'un monoplaça de competició de la Fórmula 1.

4.1 Alerons

Com que la part pràctica d'anàlisi aerodinàmic es durà a terme sobre l'aleró davanter, s'ha volgut posar èmfasi en l'explicació teòrica del comportament aerodinàmic dels alerons.

4.1.1 Estudi del perfil bàsic d'un aleró

Com ja s'ha explicat anteriorment, la funció dels alerons en un automòbil és invers al d'una ala d'avió. És a dir, la seva funció és crear una càrrega aerodinàmica o en anglès, *downforce*, que ajudarà al monoplaça a agafar les corbes del circuit amb més rapidesa.

Primer de tot estudiarem les diferents parts d'un aleró. En la següent figura (Figura 4.1) observem les parts principals que formen l'aleró d'un automòbil.

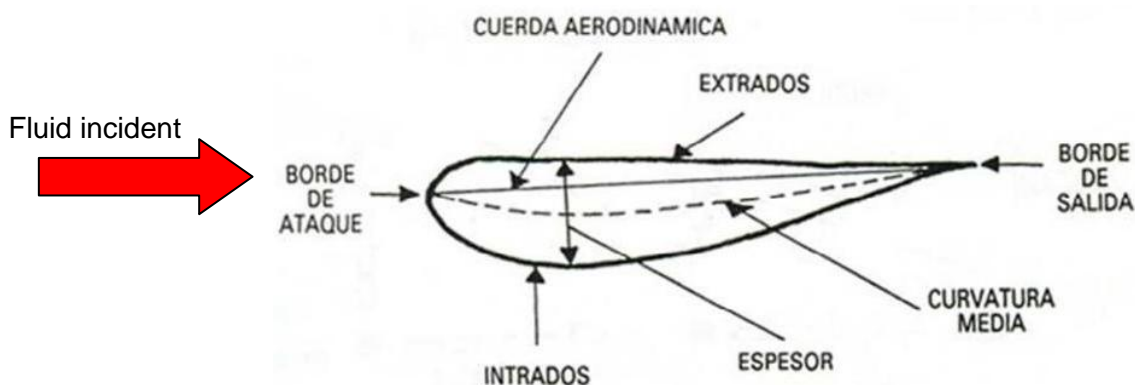


Figura 4.1: Diferents parts d'un aleró. [7]

Veiem que la primera part amb la que topa el flux d'aire és el caire d'atac, situat a la part davantera de l'aleró, amb un perfil dissenyat de tal manera que l'aire incident es divideixi entre la part superior i inferior de l'aleró produint un arrossegament o *drag* el més petit possible.

La part final de l'aleró és anomenat caire de sortida o de fuga. La línia imaginària que uneix el caire d'atac i el caire de fuga és anomenada corda aerodinàmica, i l'angle que forma aquesta corda amb el flux d'aire incident és anomenat **angle d'atac**. En la *Figura 4.2* veiem representat aquest angle d'atac.

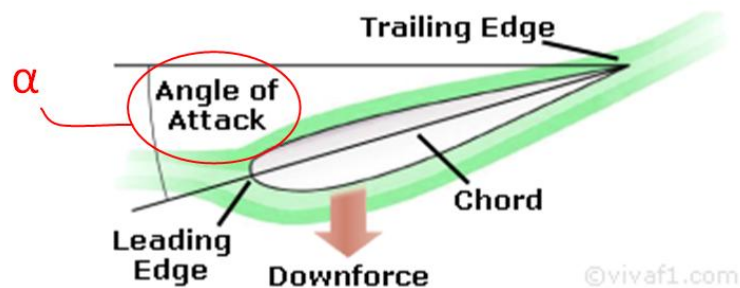


Figura 4.2: Representació de l'angle d'atac en un aleró. [8]

Segons l'angle d'atac adoptat en un aleró aconseguirem diferents coeficients de *lift* (C_L) i de *drag* (C_D), atenent que a més angle d'atac, més *lift* (*downforce* en el nostre cas) i més *drag*.

La següent gràfica (*Figura 4.3*) representa com varien aquests coeficients junt amb l'eficiència aerodinàmica (C_D/C_L) en funció de l'angle d'atac de l'aleró. Aquesta gràfica ha estat elaborada amb un software CFD (Computer Fluids Dynamics), com podria ser el ANSYS Fluent.

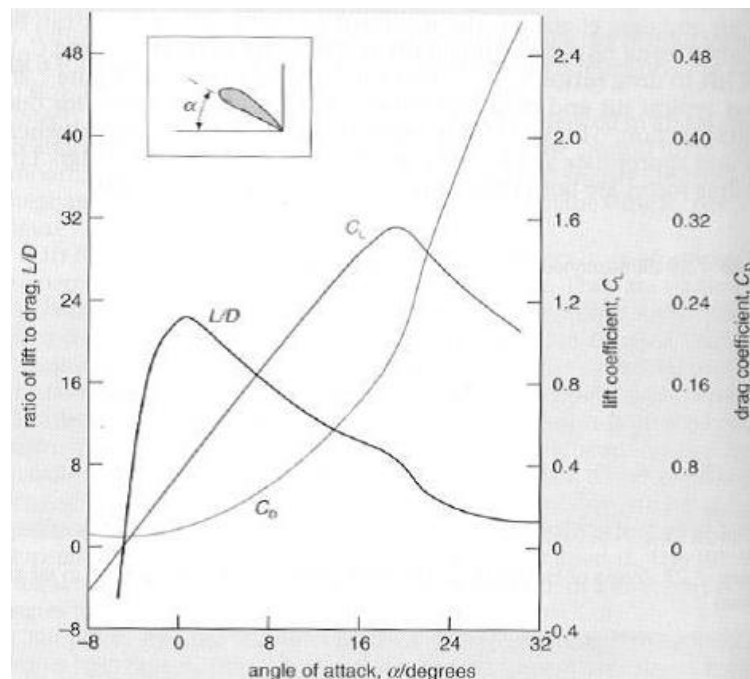


Figura 4.3: Variació de C_L , C_D i EA en funció de l'angle d'atac α .

Analitzant la *Figura 4.3* observem el comportament que ja esperàvem, en augmentar l'angle d'atac augmentem la càrrega aerodinàmica, cosa que afavoreix al comportament del monoplaça, però també augmentem l'arrossegament o *drag* produït, cosa que abaixa la velocitat punta a la qual pot arribar el vehicle.

Observem també com hi ha un punt per sobre dels 0° d'angle d'atac on l'**eficiència aerodinàmica és màxima**, punt a partir del qual el C_D augmenta quasi exponencialment.

Per tant, segons el circuit on es competeixi, interessarà un angle d'atac més gran o més petit. Si el circuit no té molts trams rectes, sinó que es basa en moltes corbes, interessarà una gran càrrega aerodinàmica per poder agafar aquestes corbes amb més rapidesa, restant importància a la velocitat punta que pugui assolir el monoplaça. En canvi, si el circuit on es competeix té molts trams rectes on s'interessa assolir grans velocitats puntes, es voldrà minimitzar tot el possible el coeficient de *drag*, per tant s'adoptarà un angle d'atac inferior.

A tot això cal afegir que hi ha un cert angle d'atac pel qual la capa límit que forma l'aire al voltant de l'aleró es desenganxa produint-se el despreniment de la capa límit, concepte ja explicat a l'apartat 3.1 d'aquest treball. Com ja s'ha comentat anteriorment, el despreniment de la capa límit dona pas a una zona de turbulències que fa que la càrrega aerodinàmica disminueixi de cop i la resistència a l'avanç augmenti. Quan succeeix aquest fet es diu que **l'aleró ha entrat en pèrdua**.

A la *Figura 4.4* observem el punt de la gràfica anterior en el qual l'aleró entra en pèrdua. Observem que el C_L disminueix en picat tal com s'ha comentat.

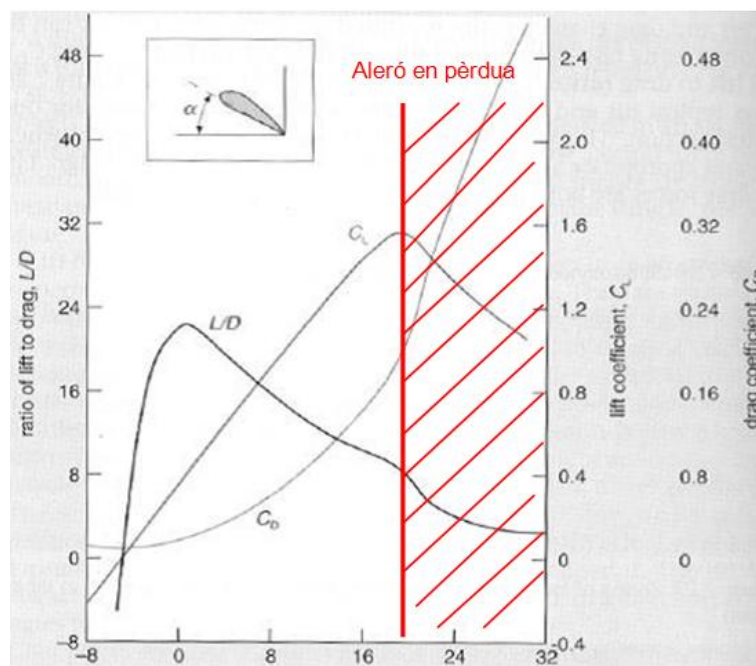


Figura 4.4: Zona gràfica on l'aleró entra en pèrdua.

En la *Figura 4.5* veiem representat el fenomen just descrit:

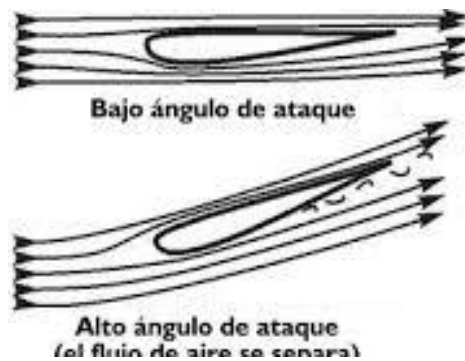


Figura 4.5: Aleró en pèrdua. [9]

4.1.2 El flap de Gurney

Degut a que no interessa que l'aleró entri en pèrdua, a principis de la dècada dels 70 es va elaborar l'anomenat **Flap de Gurney**. El Flap de Gurney és simplement una petita tira d'alumini o fibra de carboni que es col·loca en el caire de fuga de l'aleró.

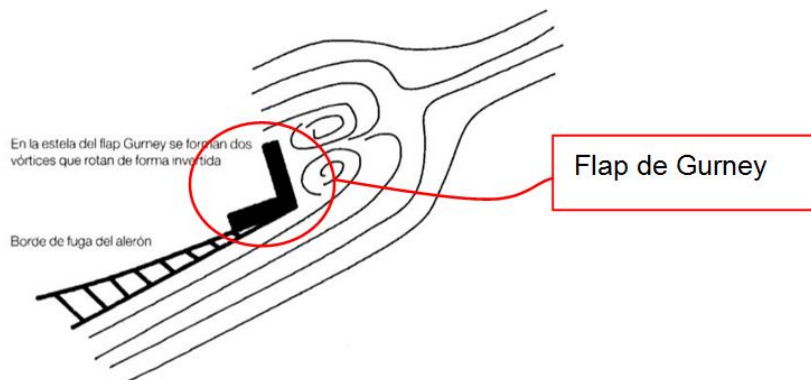


Figura 4.6: Flap de Gurney. [10]

Tal com observem en la *Figura 4.6*, quan el flux topa amb el flap de Gurney apareixen dos vòrtexs a la part posterior, generant una zona de baixa pressió que literalment succiona el flux d'aire. Amb aquest fet, la pressió augmenta a la part superior de l'aleró i disminueix a la part inferior, ajudant a la capa límit a seguir enganxada a la superfície de l'aleró, cosa que retarda el seu despreniment i permet assolir angles d'atac més grans.

Actualment el flap de Gurney està present a molts dels components aerodinàmics d'un monoplaça de la Fórmula 1. En la *Figura 4.7* veiem el flap de Gurney instal·lat en el difusor.

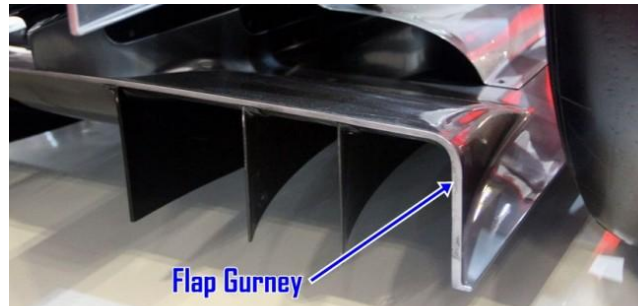


Figura 4.7: Flap de Gurney instal·lat en el difusor d'un monoplaça de F1. [11]

4.1.3 Aleró de més d'un element

Seguint la fórmula pel càlcul de F_L presentada a l'apartat 3.3 d'aquest document, veiem que a major àrea de contacte amb el flux d'aire incident, més càrrega aerodinàmica es genera. És clar que en el seu moment les escuderies van intentar augmentar l'àrea dels alerons, però com era d'esperar, es va veure que a l'incorporar un aleró més gran la capa límit es despenia amb més facilitat. És per això que es van idear els alerons amb més d'un element, permetent que l'aire fluís a través dels elements fent que aquest es mantingués enganxat a ells. En la següent imatge (Figura 4.8) observem un aleró de 3 elements.

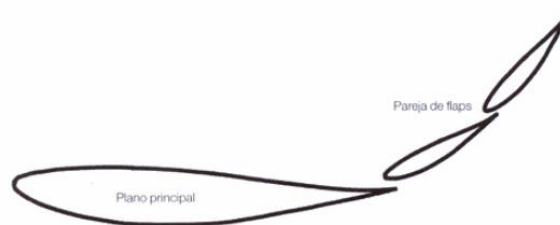


Figura 4.8: Aleró de 3 elements.

Actualment la FIA ha limitat el número d'elements per l'aleró posterior a 2. Per a l'aleró davanter el número d'elements no està limitat.

En la següent imatge (Figura 4.9) es pot observar els 5 elements que incorpora l'aleró davanter del monoplaça Redbull de l'any 2015.

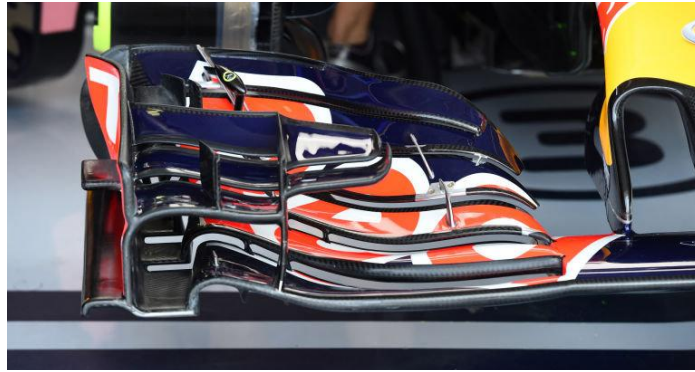


Figura 4.9: Aleró davanter de 5 elements del monoplaça RedBull 2015. [12]

4.1.4 Resistència induïda i resistència paràsit

La resistència aerodinàmica, com ja s'ha explicat, és la força que s'oposa a l'avanç d'un objecte aerodinàmic, com podria ser un aleró. Aquesta resistència aerodinàmica es pot dividir en dos components: la induïda i la paràsit.

La **resistència induïda** apareix quan l'objecte aerodinàmic en qüestió genera sustentació. Aquesta força disminueix a mesura que l'objecte guanya velocitat.

La **resistència paràsit** va relacionada amb la geometria i dimensions de l'objecte aerodinàmic i és provocada a causa de la fricció. Al contrari de la resistència induïda, la paràsit augmenta a mesura que augmenta la velocitat.

En la *Figura 4.10* podem observar una gràfica que representa el comportament de les dos components de la resistència aerodinàmica en funció de la velocitat, comportament totalment explicat en els paràgrafs anteriors.



Figura 4.10: Representació gràfica de la resistència de l'aerodinàmica total, paràsit i induïda VS velocitat. [13]

4.1.5 Aleró davanter

L'aleró davanter és un component clau en l'aerodinàmica de la Fórmula 1, ja que a més d'aportar gran part de la càrrega aerodinàmica total del vehicle, és la primera part del monoplaça en entrar en contacte amb el flux d'aire, i per tant és l'encarregat de redirigir aquest flux cap a altres parts del vehicle de tal manera que s'aconsegueixi-hi una sèrie de propòsits aerodinàmics que comentarem a continuació.

Actualment, la FIA (*Federation Internationale de l'Automobile*) limita l'amplada total del monoplaça (excloent les rodes) a 1650 mm, i com l'aleró davanter és l'element més ample de la carrosseria del cotxe, aquesta regulació va directament encarada a ell.

El principals objectius de l'aleró davanter són:

- Proporcionar càrrega aerodinàmica a l'eix davanter del monoplaça.
- Redirigir el flux d'aire net que rep de manera que envolti les rodes davanteres i així es redueixi-hi la resistència a l'avanç. També redirigir el flux de tal manera que es redueixi la resistència a l'avanç que poden provocar alguns elements com el triangle de suspensió.
- Redirigir part del flux d'aire cap als pontons (entrades d'aire del motor). Aquesta funció és molt important de cara a la correcta refrigeració del motor.
- Regular el flux d'aire que passa per sota el monoplaça.

Respecte a l'últim punt, val la pena argumentar el perquè d'aquest objectiu. El fet és que si mitjançant la geometria de l'aleró davanter aconseguim reduir l'espai disponible que té el flux d'aire per passar per sota del monoplaça, aquest circularà més ràpidament. Pel principi de Bernouilli (ja explicat en el punt 3.2.1) sabem que aquest flux d'aire circulant a gran velocitat generarà una zona de baixa pressió sota el fons pla, cosa que atraurà el cotxe cap al terra i consegüentment guanyarem adherència. Més endavant s'explicarà el Fons pla, on s'aprofundirà més en aquest concepte.

4.1.5.1 Endplates

Ja s'ha explicat que quan un aleró és sotmès a un flux d'aire incident, es crea una zona de baixa pressió a la part inferior i una zona d'alta pressió a la part superior. Aquest fenomen fa que l'aire de la part superior tendeixi a circular a la part inferior, tal i com mostra la *Figura 4.11*.



Figura 4.11 : [14]

Quan l'aire circula de la part de dalt de l'aleró a la de baix, es generen uns vòrtexs o turbulències que fan augmentar en gran mesura la resistència a l'avanç. A la Figura 4.12 es pot observar una representació d'aquest fenomen.

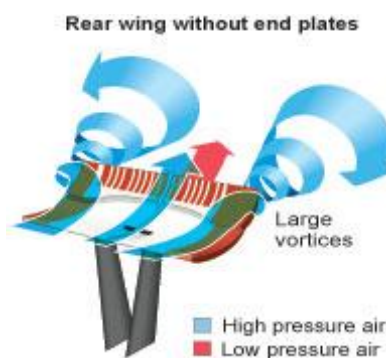


Figura 4.12: Vòrtexs creats en l'aleró posterior d'un F1 al no portar endplates. [15]

Per tal que aquest fenomen no apareixi-hi, simplement s'acoblen dues xapes als extrems de l'aleró. D'aquesta forma l'aire no pot circular de la part superior a la inferior i la resistència a l'avanç disminueix. Aquestes xapes són els anomenats *endplates*.

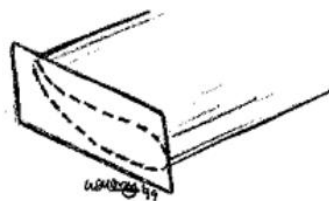


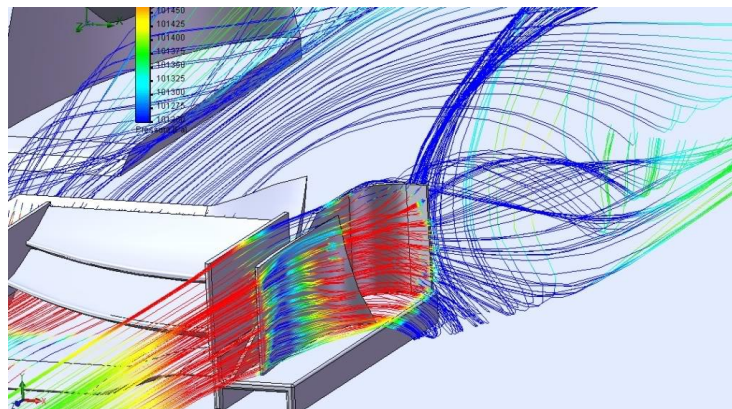
Figura 4.13: Aleró amb endplates acoblats.[16]

En la Figura 4.14 podem observar com a l'afegir els *endplates*, els vòrtexs d'aire generats passen a ser molt més petits, cosa que fa reduir la resistència a l'avanç.



Figura 4.14: Vòrtexs creats en l'aleró posterior d'un F1 al portar endplates.[17]

A tot això val a dir que en el cas de l'aleró davanter aquest element té una segona funció, la de redirigir el flux d'aire de tal manera que l'impacte amb les rodes sigui el més suau possible. És per això que adopten una geometria una mica diferent dels *endplates* de l'aleró posterior, tal com observem en la *Figura 4.15*, que representa la circulació del flux d'aire en l'*endplate* esquerra de l'aleró davanter d'un Fórmula 1.



*Figura 4.15: Circulació del flux d'aire en l'endplate esquerra d'un aleró davanter.
[18]*

4.1.5.2 Flaps

Com no hi ha limitacions a l'hora de col·locar elements sobre l'aleró davanter, els equips afegeixen una sèrie de flaps. Degut a que la FIA prohibeix la seva superposició amb la secció central neutra, tendeixen a estar units als *endplates*. Anteriorment aquests elements només es col·locaven per tal d'augmentar la càrrega aerodinàmica, però actualment tenen la funció de desviar el flux d'aire al voltant de les rodes davanteres.

En la *Figura 4.16* veiem una imatge dels flaps en l'aleró davanter d'un F1 de l'equip Mercedes de l'any 2012.

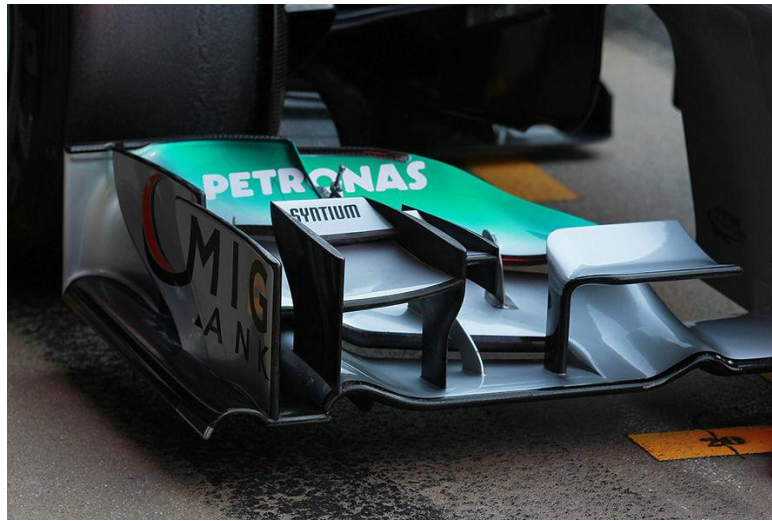


Figura 4.16: Flaps de l'aleró davanter del monoplaça de l'equip Mercedes de l'any 2012. [19]

4.1.5.3 Generador de vòrtexs

Els generadors de vòrtexs en l'aleró davanter són bàsicament unes geometries que es posen en l'aleró de tal forma que en incidir-hi el flux d'aire es generin uns vòrtexs en un determinat sentit per tal de succionar l'aire que circula pel fons pla. En el punt 4.2 s'explicarà el Fons pla i per a què interessa extreure aire de sota el cotxe.

4.1.6 Aleró posterior

L'aleró posterior és l'encarregat, junt amb el difusor, de transmetre càrrega aerodinàmica a l'eix posterior del cotxe. Es situa en una posició elevada per tal que el flux d'aire incident sigui el més net possible. A l'igual que l'aleró davanter, aquest element aerodinàmic aporta força càrrega aerodinàmica però també produeix gran resistència a l'avanç, és per això que el seu angle d'atac variarà segons si el circuit on es competeix és ràpid o lent. A la següent figura (*Figura 4.17*) s'observa l'aleró posterior d'un F1.



Figura 4.17: Aleró posterior d'un F1. [20]

Les dimensions de l'aleró posterior estan regulades per la FIA a 950 mm d'alt i 750 mm d'amplada.

Un problema a destacar sobre aquest element és la diferència de pressions que apareixen en la seva geometria. L'alta pressió que hi ha en la part superior de l'aleró amb la baixa pressió que apareix a la part inferior i la que hi ha pels costats ocasiona fluxos en espiral que fan augmentar la resistència a l'avanç. És per aquest motiu que es col·loquen una espècie de “**brànquies**” en els *endplates* laterals per tal d'igualar les pressions a banda i banda dels *endplates*. En la Figura 4.18 es poden observar aquestes “brànquies”.



Figura 4.18: Brànquies de l'aleró posterior d'un RedBull F1 de l'any 2015. [21]

4.1.6.1 DRS

El DRS és un mecanisme que té incorporat l'aleró posterior i que permet al pilot variar l'angle d'atac d'un flap addicional d'aquest element. Quan el DRS està activat, aquest flap addicional s'obre de tal manera que la resistència a l'avanç de l'aleró posterior sigui inferior. Això també provoca que la càrrega aerodinàmica disminueixi. A la següent imatge (*Figura 4.19*) podem observar l'aleró posterior d'un monoplaça amb el DRS desactivat (a l'esquerra) i amb el DRS activat (a la dreta).

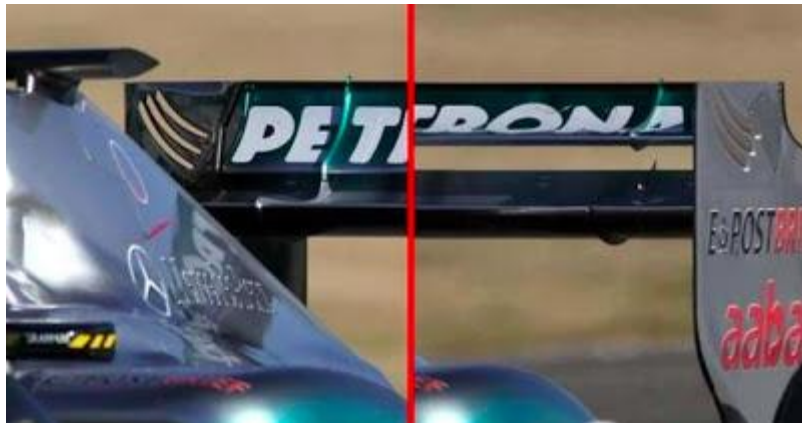


Figura 4.19: Esquerra → DRS desactivat; Dreta → DRS activat. [22]

L'any 2011 la FIA va posar l'obligació a tots els monoplaços d'incorporar aquest mecanisme per tal d'augmentar el nombre d'avançaments en circuit, i així augmentar l'espectacle en pista.

4.2 Fons pla

Fons pla és el nom que se li dona a la panxa d'un monoplaça de Fórmula 1, i malgrat ser la part del cotxe que més desaparecebuda passa, és una de les més importants aerodinàmicament, ja que és l'element del monoplaça que més càrrega aerodinàmica genera. L'objectiu principal és que el flux d'aire circulant per sota el cotxe sigui el menor possible. Com ja s'ha explicat en l'últim paràgraf de la introducció al punt 4.1.5, sabem que si aconseguim reduir l'espai disponible que té el flux d'aire per passar per sota el monoplaça, aquest circularà més ràpidament. Pel principi de Bernoulli sabem que aquest flux d'aire circulant a gran velocitat generarà una zona de baixa pressió sota el fons pla, cosa que atraurà el cotxe cap a terra, i consegüentment, guanyarem adherència.

Al gran augment de càrrega aerodinàmica que obté el cotxe quan l'espai entre el fons pla i el terra es redueix se'n diu **efecte sòl**. A la següent figura (*Figura 4.20*) observem aquest efecte explicat a partir del principi de Bernoulli en un tub de Venturi.

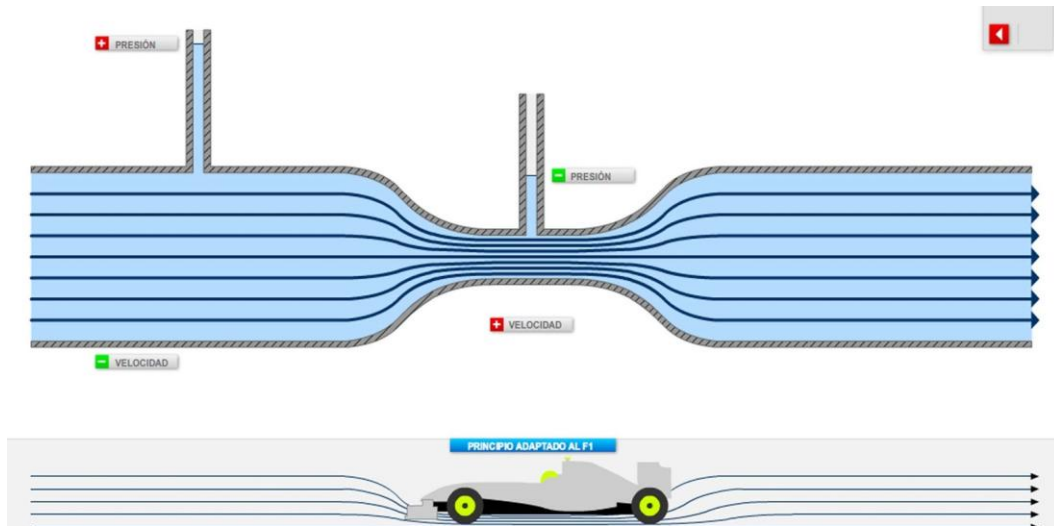


Figura 4.20: Efecte sòl explicat a partir del principi de Bernoulli. [23]

Reduir el flux d'aire que circula per sota el monoplaça es pot aconseguir de diverses formes (algunes d'elles ja s'han explicat anteriorment):

- Modificant la geometria i abaixant l'aleró davanter fins el màxim permès (100 mm) per tal de deixar passar el mínim flux d'aire.
- Incloure generadors de vòrtexs a l'aleró davanter.
- Acabar el perfil del difusor amb "Flaps de Gurney".

Els flaps de Gurney al final del difusor, com ja s'ha comentat, generen uns vòrtexs a la part posterior de l'element que succionen el flux d'aire circulant per la part inferior del difusor, cosa que ajuda a extreure l'aire del fons pla, i consegüentment, fer que aquest circuli més ràpidament.

- Dissenyar els cantons del fons pla de tal forma que es faciliti l'extracció de l'aire de sota el monoplaça. Als dissenys d'aquestes geometries se li solen dir "llavis".



Figura 4.21: Fons pla d'un monoplaça de F1. [24]

Tal com s'observa a la *Figura 4.21*, per reglaments de la FIA el fons pla ha d'incorporar un tauló de fusta (o de qualsevol altre material la densitat del qual estigui entre 1,3 i 1,45 g/cm³) per evitar el desgast del xassís i a la vegada respectar els 100 mm mínims que per normativa han d'haver-hi entre el cotxe i l'asfalt.

4.3 Difusor

El difusor és un element situat entre les rodes posteriors del cotxe i sota l'aleró posterior. És l'element del monoplaça que té l'eficiència aerodinàmica més alta, ja que aporta molta càrrega aerodinàmica sense crear gairebé resistència a l'avanç. El difusor en si pot arribar a crear fins a un **40% de la càrrega aerodinàmica total del cotxe**, és per això que aquest element està molt regulat per la FIA, que li imposa unes dimensions de 125 mm d'alt i 1000 mm d'amplada.

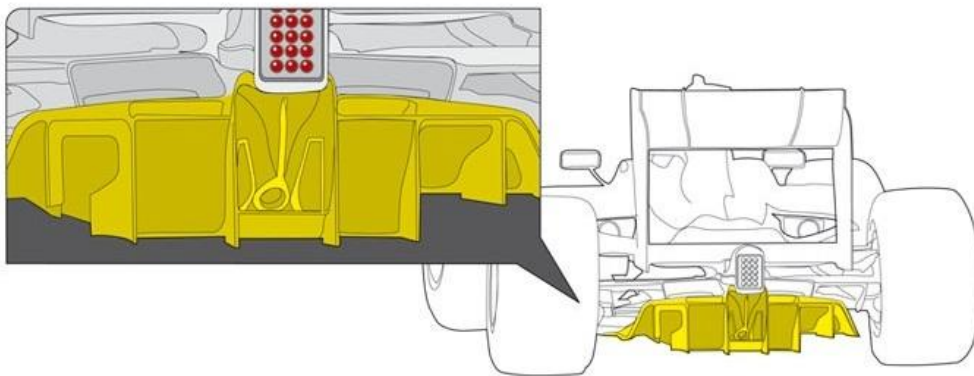


Figura 4.22: Difusor d'un F1. [25]

La funció clau del difusor és la d'expandir el flux d'aire que arriba del fons pla, d'aquesta manera es succiona aquest flux fent que la seva velocitat sota el monoplaça augmenti. Per tal que la baixa pressió sota el cotxe no es perdi en gran mesura, el difusor té incorporat uns **nervis** que mantenen aquesta baixa pressió en compartiments separats, tal com s'observa a la *Figura 4.22* presentada anteriorment.

4.4 Pontons

Els Pontons són les entrades d'aire que té el monoplaça per tal de dur a terme la refrigeració del motor, situats un a cada costat del *cockpit* (seient del pilot). Aquests elements contenen els radiadors d'aigua, l'oli del motor i el radiador de la caixa de canvis. Són uns elements que afecten negativament en l'aerodinàmica del cotxe, però que al ser 100% necessaris, no es pot prescindir del seu ús. Per tal de minimitzar aquest efecte negatiu, els pontons es dissenyen de tal manera que aportin la mínima resistència a l'avanç possible, fins i tot s'afegeixen aletes addicionals sobre la seva estructura per tal de dirigir adequadament el flux d'aire cap a la part posterior del monoplaça.



Figura 4.23: Pontons Mercedes AMG F1. [26]

A tot això, els pontons no només alberguen els intercanviadors de calor del F1, sinó que també alberguen una sèrie de components electrònics necessaris per als controls del monoplaça. En la *Figura 4.24* es pot observar on van col·locats alguns d'aquests components electrònics.

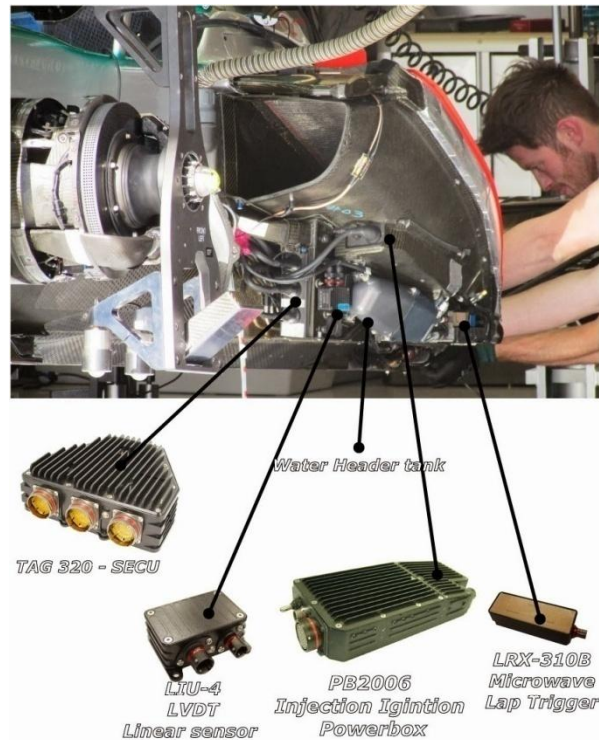


Figura 4.24: Elements electrònics albergats en els pontons d'un F1.

4.5 Deflectors laterals

La funció dels deflectors laterals, al contrari de molts altres elements del monoplaça, no és la d'augmentar la càrrega aerodinàmica, sinó que estan pensats per redirigir el flux d'aire incident en el cotxe. En la *Figura 4.25* s'observen els deflectors laterals d'un F1.



Figura 4.25: Deflectors laterals d'un F1.[27]

Per ser més exactes, els deflectors laterals tenen 2 funcions bàsiques:

- 1) Canalitzar el flux d'aire provinent de les rodes cap als pontons per tal de millorar la refrigeració del motor.
- 2) Redirigir una part del flux d'aire cap al difusor per tal de millorar l'aerodinàmica del vehicle.

5. Disseny assistit per ordinador (CAD) i dinàmica computacional de fluids (CFD)

El que ens permet la dinàmica computacional de fluids és l'estudi dels fenòmens relacionats amb el flux, la transferència de calor i les reaccions químiques dels fluids mitjançant les equacions amb les quals aquests es regeixen. Tots els càlculs pertinents es duen a terme mitjançant un sistema algebraic computacional.

Tot i que en els últims anys aquests sistemes de simulacions per ordinador hagin avançat de forma exponencial, no representen a la perfecció les interaccions del fluid amb l'objecte d'estudi, és per això que paral·lelament es fan assajos amb el túnel de vent per tal de comparar els resultats obtinguts amb el CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

Per tal de realitzar correctament l'anàlisi de l'aleró davanter s'han seguit els següents passos:

- 1) Creació de la geometria.
- 2) Mallat.
- 3) Càlcul i simulacions.
- 4) Anàlisi dels resultats.

Per tal de mostrar el procés seguit es farà una explicació en detall de la metodologia emprada per la creació i anàlisi del primer model d'aleró. En el següent apartat es durà a terme un seguiment més breu i concís dels resultats obtinguts per les diverses modificacions realitzades sobre el model inicial.

5.1 Creació de la geometria

5.1.1 Disseny CAD

Com que la geometria d'un aleró real d'un Fórmula 1 és massa complexa, la versió acadèmica d'ANSYS *Fluent* no permetia dur a terme el seu anàlisi, ja que el mallat sobrepassava el número d'elements permesos. Per aquest motiu es va decidir crear un aleró davanter des de zero amb l'ajuda del programari CAD *SolidWorks*. D'aquesta manera es podria dissenyar un aleró amb una geometria més senzilla per tal de poder ser analitzada amb la versió disponible del *Fluent*.

El primer model que es va dissenyar és el que apareix en la *Figura 5.1.1*.

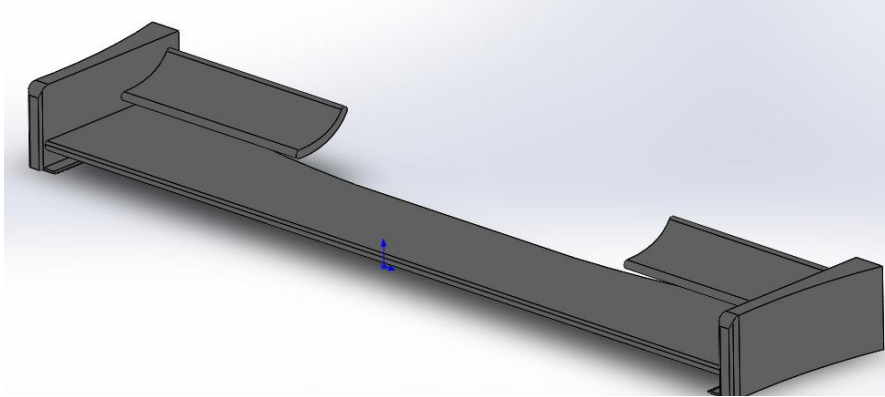


Figura 5.1.1: Model 1.

Val a dir que es va dissenyar l'aleró sencer, però a l'hora de fer les simulacions es va tallar el model per la meitat per tal de reduir el nombre d'elements emprats en el mallat i així optimitzar el temps de les simulacions.

En el moment d'intentar canviar l'angle d'atac del perfil alar d'aquest primer model va ser quan van sorgir els primers problemes. El fet és que la manera amb la qual havia estat dissenyat el perfil alar impedia canviar el seu angle d'atac (el qual eren 0°). Es va intentar modificar la geometria de totes les formes possibles, però les múltiples correlacions que tenien tots els elements de l'aleró amb el perfil alar ho van fer impossible. És per aquest motiu que es va decidir dissenyar un nou aleró des de zero, de tal manera que fos possible anar variant l'angle d'incidència del perfil alar. El model resultant, amb un angle d'incidència de 0° i al qual anomenarem *Model 0°* és el que queda representat en la *Figura 5.1.2*.

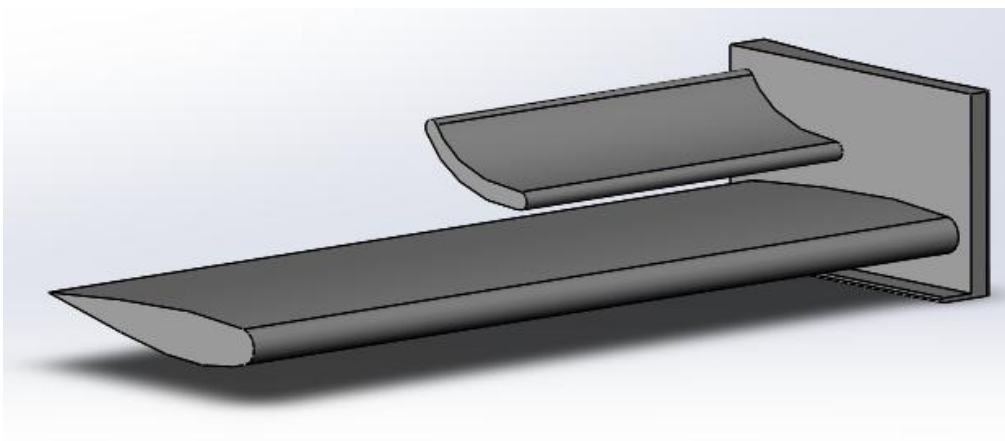


Figura 5.1.2: Model 0°

Tal com es veu a la *Figura 5.1.2*, al contrari del Model 1, es va decidir dissenyar el perfil alar imitant el perfil bàsic d'un aleró com el que hi ha representat en la *Figura 5.1* de l'apartat 4.1.1 d'aquest document. El flap i l'*endplate* es van dissenyar de la mateixa forma que en el Model 1. En la següent figura (*Figura 5.1.3*) podem observar el disseny 2D d'aquest perfil realitzat amb SolidWorks.

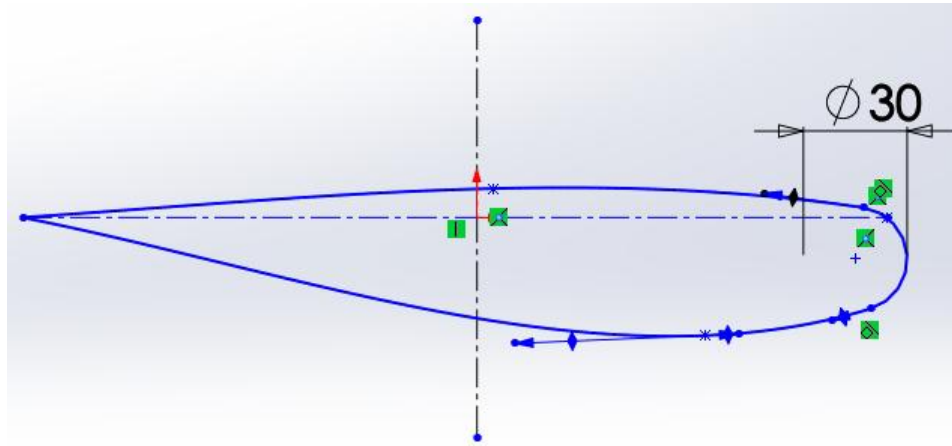


Figura 5.1.3: Disseny 2D del perfil alar.

A continuació es va afegir un flap amb un angle d'incidència força gran amb el propòsit d'augmentar el *downforce* generat. És per això que d'es d'un principi ja es va tenir en compte que aquest element provocaria una gran resistència a l'avanç. La llargada d'aquest flap s'ha establert en 0,345 m.

A causa de la gran diferència de pressions que hi ha entre la part interior i exterior dels *endplates* en la zona inferior del perfil alar, s'ha decidit incorporar un petit sortint per evitar que el flux d'aire passi d'una zona a l'altre. S'ha de tenir en compte que la pressió en la part inferior del perfil alar és considerablement inferior a la de la part exterior de l'*endplate*. En la *Figura 5.1.4* podem observar en detall aquesta geometria.

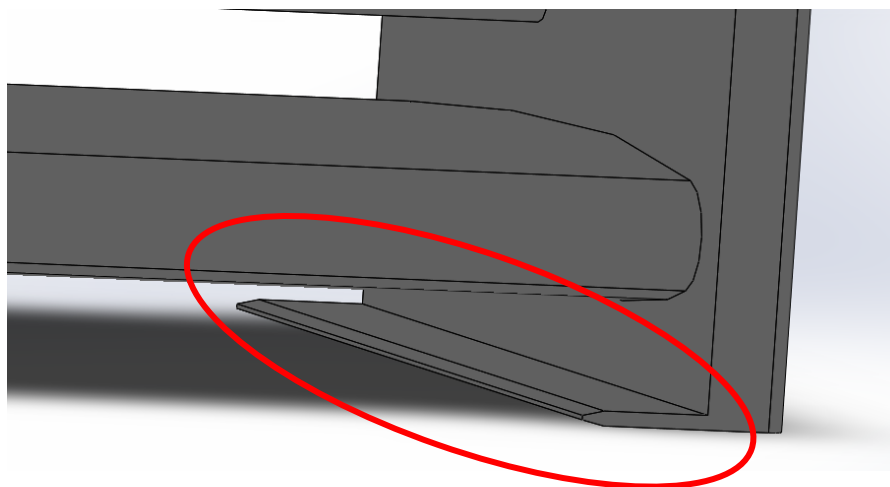


Figura 5.1.4: Imatge en detall de la geometria situada sota del perfil alar.

Per últim, els *endplates* s'han dissenyat de tal forma que es recirculi el flux d'aire incident al voltant de les rodes. Per tal d'aconseguir aquest propòsit s'ha encorbat la part exterior dels *endplates*, tal com s'observa a la *Figura 5.1.5*.

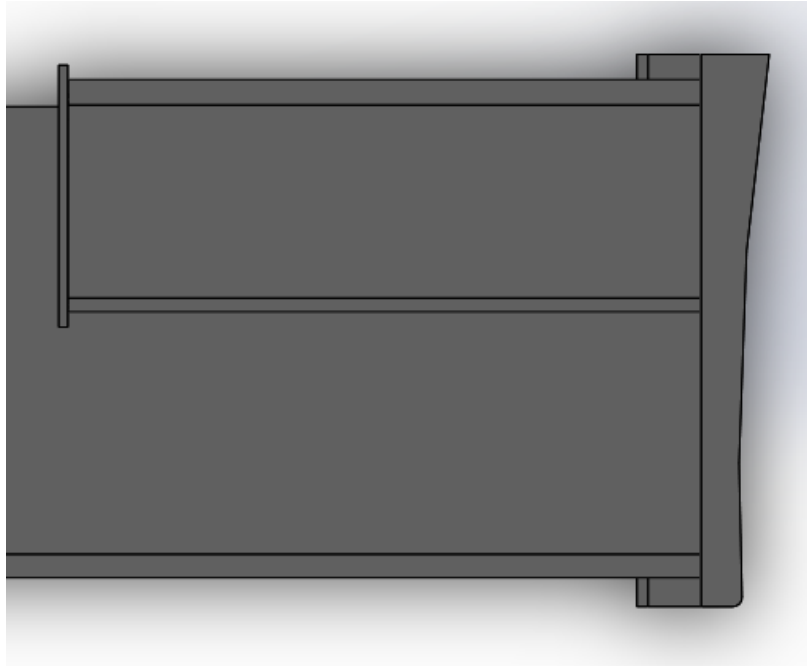


Figura 5.1.5: Vista en planta del model dissenyat.

Per tal d'evitar geometries complexes i reduir els problemes alhora de fer el mallat de la peça es van arrodonir i simplificar totes les arestes que tenien angles molt aguts.

5.1.2 Creació de la geometria en l'ANSYS FLUENT

Un cop el model en 3D va estar dissenyat, es va procedir a importar-lo al *Fluent*. El següent pas va ser crear el volum de control, el qual va tenir unes dimensions proporcionals a la longitud característica de tot l'aleró L tal com s'observa a la *Figura 5.1.6*.

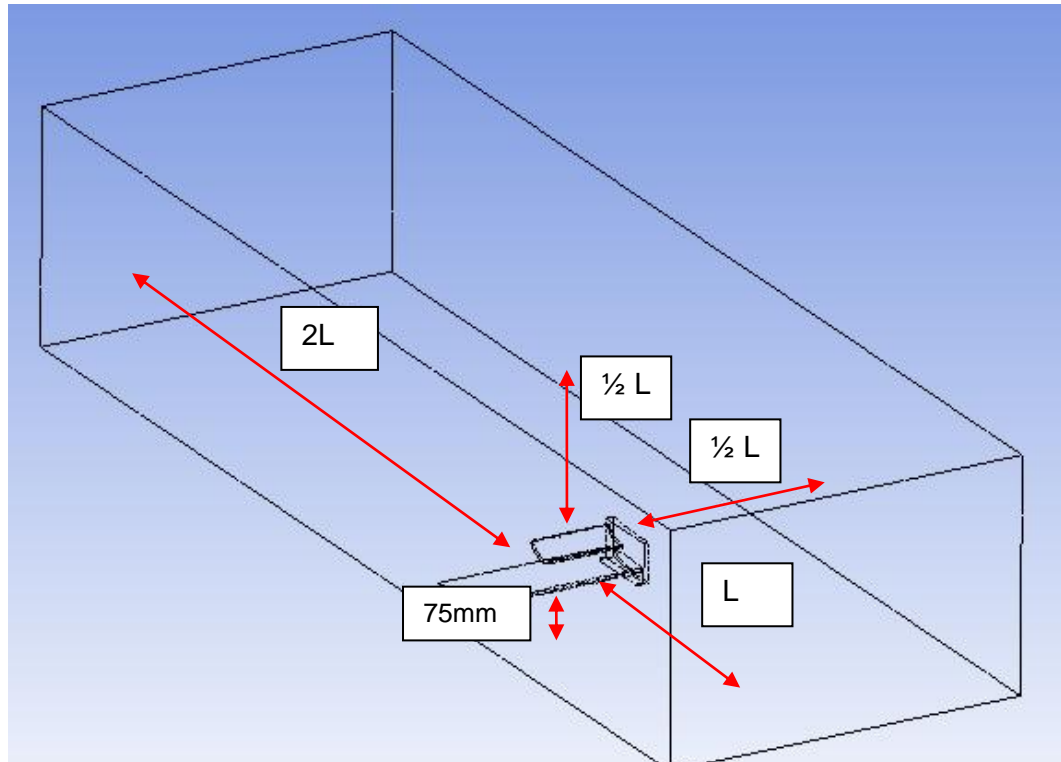


Figura 5.1.6: Model 0° amb el volum de control.

La longitud característica (L) de l'aleró sencer és de 1,58 m, i la distància entre l'aleró i el terra s'ha fixat en 75 mm, ja que és la mínima permesa per la FIA.

Per últim es va extreure el volum de l'aleró del volum de control amb l'operació *Subtract*.

5.2 Mallat

El següent pas es realitzar el mallat del model. Un bon mallat en un estudi de CFD es de vital importància per obtenir resultats precisos i fiables. La mida dels elements finits i la qualitat dels mateixos determinen la potència necessària per dur a terme els càlculs de la simulació i el temps de processament. Com més elements i més petits, major serà el temps de càlcul i els recursos necessaris per realitzar la simulació, però més fiable i precisos seran els resultats. Per tant, s'ha d'arribar a un número i mida dels elements pels quals els resultats siguin fiables però no requereixin de grans recursos computacionals i temps de càlcul.

Primer de tot, abans de fer el mallat s'han d'especificar les diferents cares del volum de control:

- **Inlet:** Cara per on entra el flux d'aire.
- **Outlet:** Cara posterior per on surt el flux d'aire.
- **Symmetry wall:** Cara de simetria. Aquesta és la cara que talla l'aleró per la meitat. A l'imposar que aquesta cara és de simetria, automàticament el *Fluent* extrapola els resultats de mig aleró a l'aleró sencer.
- **Road:** El terra.
- **Wall 1:** Cara superior.
- **Wall 2:** Cara paral·lela i contrària a la cara de simetria.

En la gran majoria de les simulacions s'ha optat per un mallat automàtic, amb mallat avançat en les zones del model amb curvatures. Com es treballa amb una versió acadèmica d' *ANSYS Workbench*, el nombre d'elements per mallat està limitat a 5.120.000 elements, és per això que la qualitat del mallat escollida ha estat *Coarse* (la més senzilla) en tots els casos, ja que sinó el programari no deixava realitzar la simulació.

Primer de tot cal remarcar que per aquest primer model s'han analitzat dos tipus de mallat, el primer amb el paràmetre ***Span Angle Center*** a *Medium* i després a *Fine*. El *Span Angle Center* bàsicament estableix el refinament en les zones amb curvatures. La malla es subdividirà en zones corbades fins que els elements individuals formin un angle entre els següents valors segons l'opció escollida:

- *Coarse*: -91° a 60°
- *Medium*: -75° a 24°
- *Fine*: -36° a 12°

Observem que com més petit és el rang d'angles, en més elements es subdividirà la malla i més precisos i exactes seran els resultats obtinguts.

En les següents imatges podem observar amb més claredat la diferència entre el mallat amb *Span Angle Center* a *Fine* i a *Medium*:

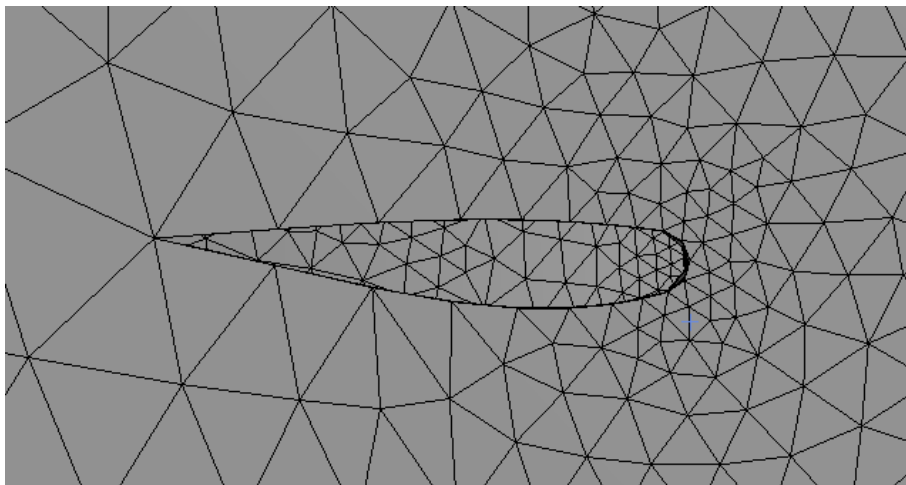


Figura 5.2.1: Mallat amb Span Angle Center: Medium.

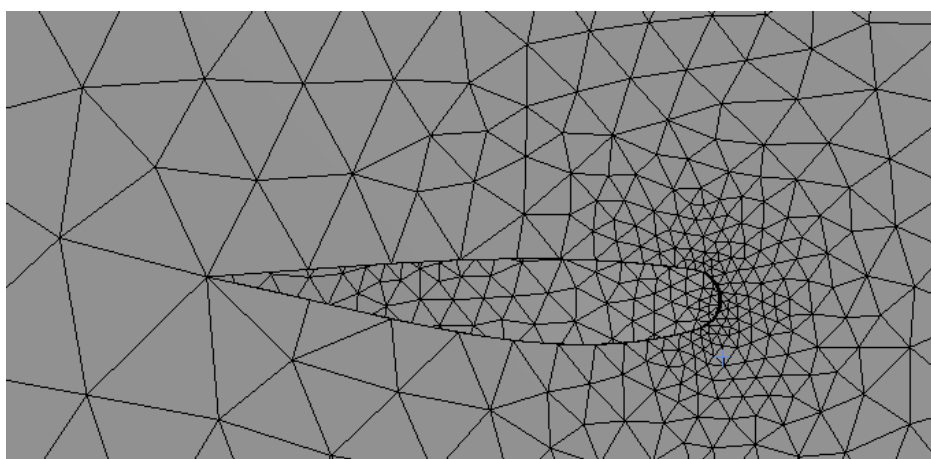


Figura 5.2.2: Mallat amb Span Angle Center: Fine

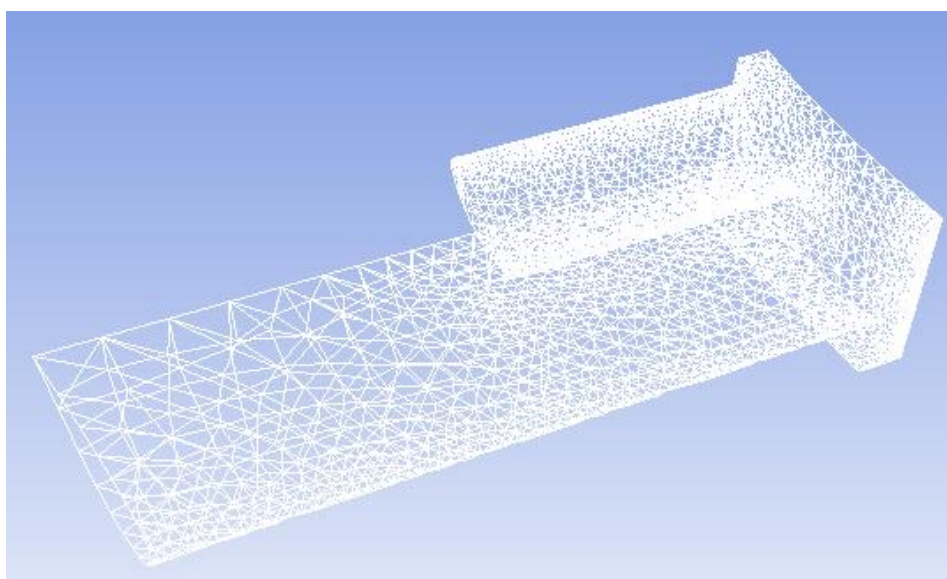


Figura 5.2.3: Mallat Model 0 ° amb Span Angle Center: Fine.

En la *Figura 5.2.3* es pot observar com el mallat automàtic deixa mallades amb més elements i d'una mida més petita les zones amb curvatures més pronunciades com el caire d'atac del perfil alar per tal que els resultats en aquestes zones clau siguin més precisos i exactes.

En la següent imatge veiem també com la part del terra pròxima a l'aleró queda mallada d'una forma més definida. Això és degut a la proximitat de l'aleró amb el terra.

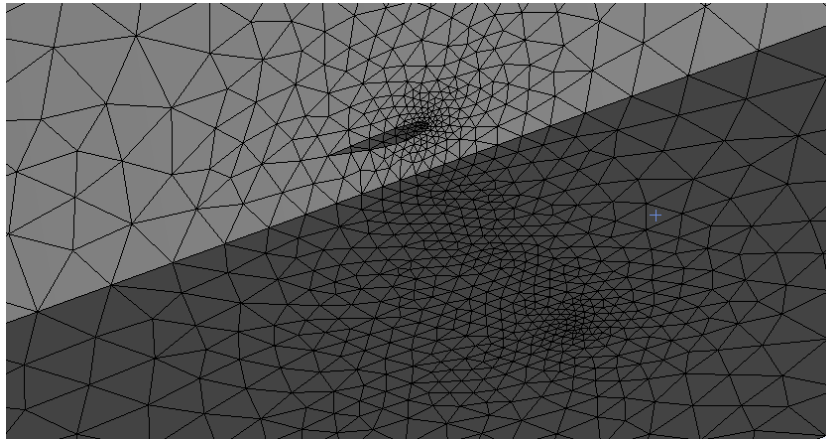


Figura 5.2.4: Mallat del terra a la zona inferior de l'aleró.

5.3 Solution setup

Un cop tenim el mallat fet haurem d'imposar les condicions de contorn. Primer de tot s'ha de triar quin model de turbulència es vol imposar per dur a terme les simulacions. Dintre dels diferents models de turbulència, els més comuns són:

K- epsilon Realizable

- Model de dues equacions.
- Mal comportament amb forts gradients de pressions adversos.
- Tot i tenir un mallat pobre s'aconsegueixen bons resultats.
- Utilitzat sobretot en fluxos externs.

K- omega STT

- Model de dues equacions.
- Molt bon comportament davant de forts gradients de pressions adversos.
- Utilitzat freqüentment en fluxos interns.
- Molt utilitzat en l'aerodinàmica

- Amb la opció STT combina el millor de les característiques d'ambdós models.

En el cas d'aquest projecte, com el flux d'aire que circula al voltant d'un aleró genera forts gradients de pressió, com per exemple en la zona entre l'aleró i el terra, utilitzarem el model *K – omega STT*, que a més inclou el millor del model *K – epsilon*.

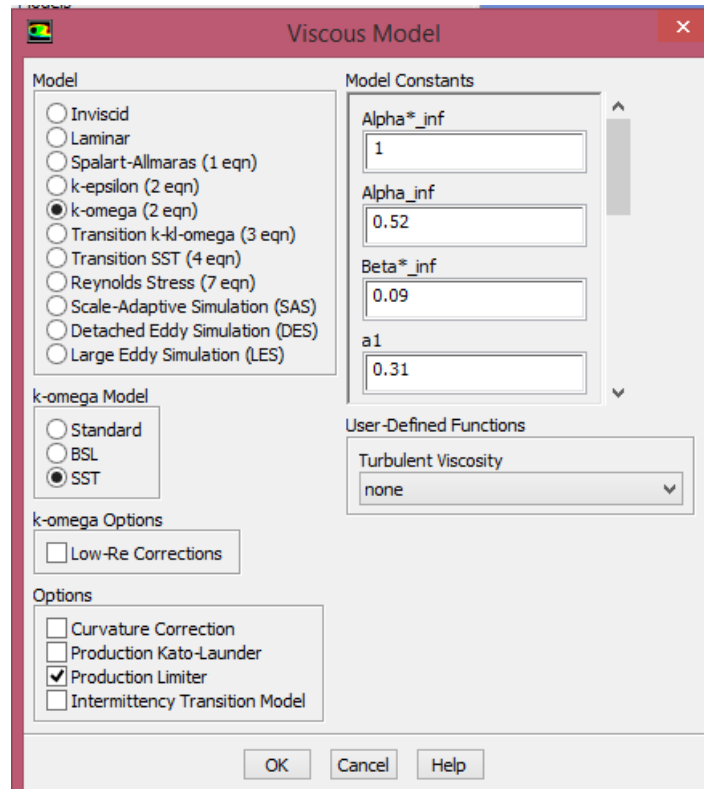


Figura 5.3.1: Característiques del model de turbulència *K-omega STT*.

El següent pas és definir les **condicions de contorn**. Les condicions de contorn per les diferents cares del volum de contorn són les següents:

- **Symmetry wall:** Condició de simetria a la paret que talla l'aleró pel mig (*symmetry*).
- **Inlet:** Condició d'entrada d'aire (*velocity inlet*) a la paret frontal a una velocitat de 45 m/s (162 km/h), velocitat mitja tenint en compte totes les zones en un circuit de competició. Com l'aleró davanter rep un flux d'aire totalment net, introduïm una intensitat de turbulència de l'1%.
- **Outlet:** Condició de sortida d'aire (*pressure outlet*) a la paret posterior. Com s'està treballant amb un flux extern imposen que estem a pressió atmosfèrica, per tant introduïm una pressió relativa de 0 Pa. Finalment s'introdueix una

intensitat de turbulència del 5%, ja que degut a la interacció del flux d'aire amb l'aleró, la turbulència serà més gran que a l'entrada.

- **Road:** Condició de paret en moviment (*moving wall*) a la cara inferior. Imposem una velocitat de moviment igual a la del flux d'entrada (45 m/s) i en la mateixa direcció i sentit.
- **Wall 1 i Wall 2:** A les parets restants introduïm la condició de paret estacionària amb lliscament nul.

A continuació es procedeix a introduir els valors de referència (*Reference values*). Primer de tot introduïm l'àrea frontal de l'aleró, que surt de 0,2287 m² per l'aleró sencer, obtinguda a partir de l'opció *Report* → *Projected Areas*. També s'introdueix la longitud característica, que mesurada al *SolidWorks* dona de 0,3 m.

Per tal de visualitzar els coeficients de *drag* (C_D) i de *lift* (C_L) imposem en l'apartat *Monitors* que ens mostri les gràfiques en temps real i ens mostri també els valors numèrics per pantalla.

Finalment inicialitzem la solució i simulem el model amb unes 100 iteracions, per tal de veure si els resultats són estables o no. Un cop acabada la simulació amb les 100 iteracions i observat que els residus tendeixen a estabilitzar-se, es procedeix a realitzar una simulació amb 700 iteracions. En el cas del mallat amb el *Span Angle Center* a *Medium* va convergir a la iteració 464, en el cas del *Span Angle Center* a *Fine* va convergir a la iteració 803 i amb un temps de simulació molt més elevat.

Tot seguit observem el gràfic dels residus en la *Figura 5.3.2*. S'observa com la gran majoria dels residus arriben per sota de l'ordre de 10^{-3} i queden estabilitzats, per tant considerem la solució com a bona.

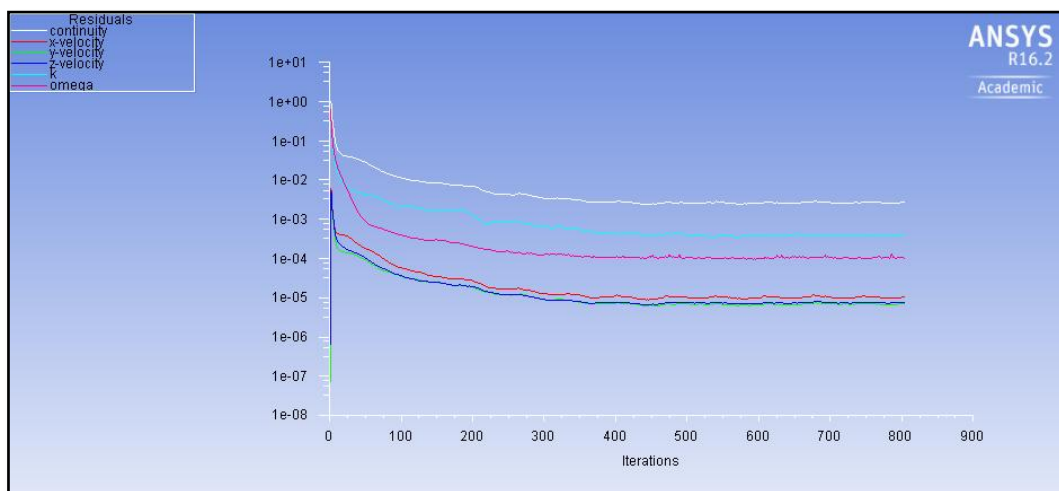


Figura 5.3.2: Gràfic dels residus de la simulació amb *Span Angle Center: Fine*.

5.4 Anàlisi dels resultats

5.4.1 Model 0°

Un cop la simulació ha convergit ens disposem a analitzar els resultats obtinguts. Primer de tot observem quins coeficients de *lift* i de *drag* han sortit i si es poden considerar com a bons o no. Amb aquests coeficients i amb les expressions presentades a l'apartat 3.3 d'aquest document, calculem les forces aerodinàmiques de *drag* (F_D) i de *lift* (F_L). També calculem l'eficiència aerodinàmica (EA). Tal com s'ha comentat anteriorment, per aquest primer model s'ha dut a terme la simulació per dos tipus de mallats diferents, un amb el *Span Angle Center a Medium* i l'altre a *Fine*. Els resultats obtinguts per aquests dos mallats han estat els següents:

	C_L	C_D	F_D (N)	F_L (N)	EA
Model 0° (S.A.C: Medium)	-1,689	0,291	81,97	424,15	5,804
Model 0° (S.A.C: Fine)	-1,649	0,322	91,29	414,31	5,125

Taula 5.4.1.1: Valors numèrics dels coeficients i forces aerodinàmiques pel Model 0°.

Veiem que els resultats no difereixen en gran mesura, tot i així l'autor del projecte ha considerat la diferència com a suficient per a realitzar les properes simulacions amb un mallat amb *Span Angle Center a Fine*, obtenint així uns resultats més precisos.

Les gràfiques de les evolucions dels coeficients al llarg de les iteracions són les que es mostren a continuació:

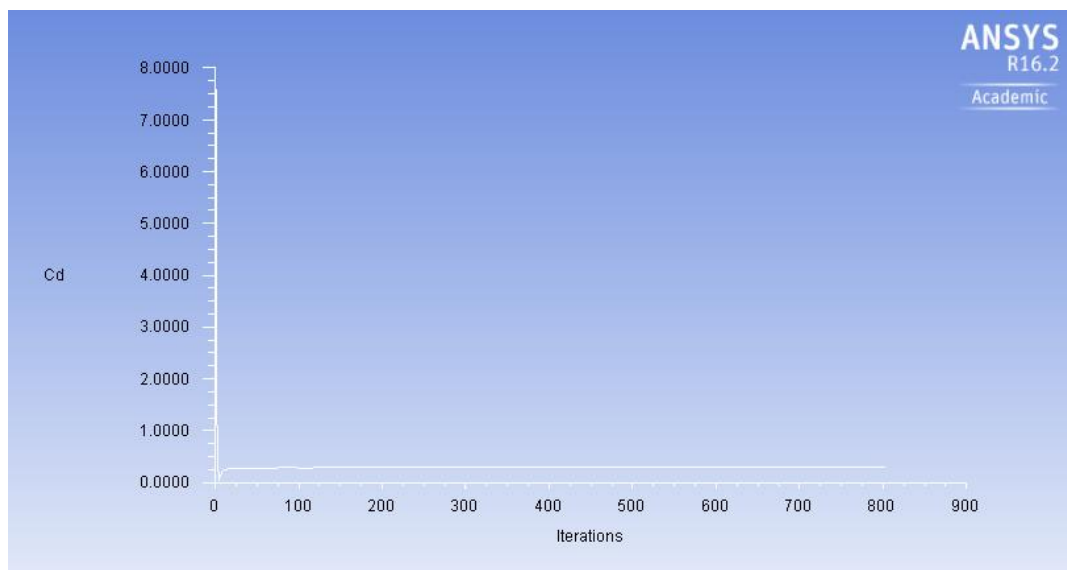


Figura 5.4.1.1: Gràfica C_D .

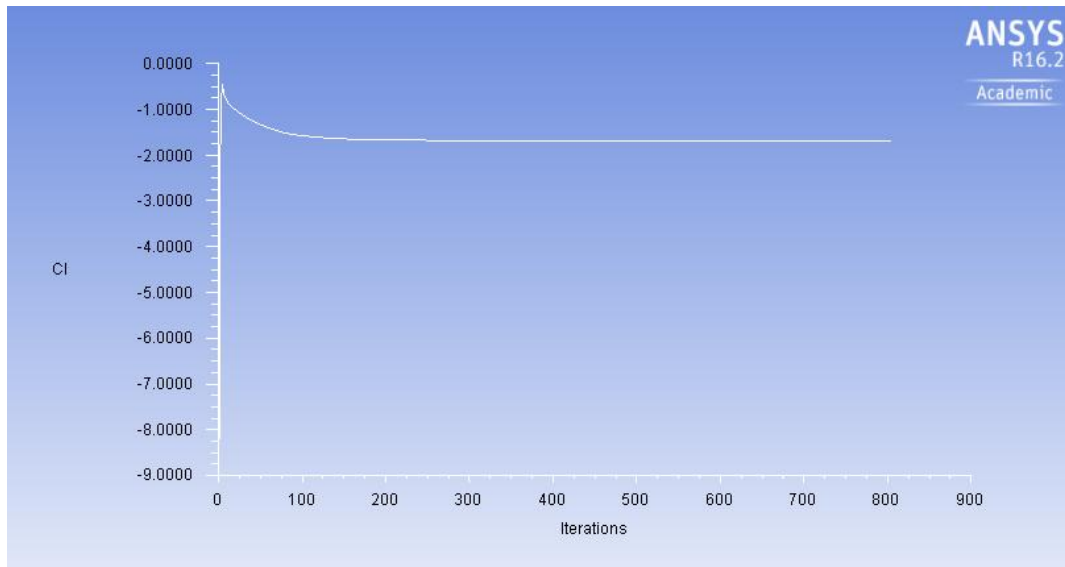


Figura 5.4.1.2: Gràfica C_L .

Observem que el C_L surt negatiu degut a que en comptes de generar sustentació, l'aleró genera càrrega aerodinàmica o *downforce*.

En la següent imatge observem la distribució de pressions en l'aleró:

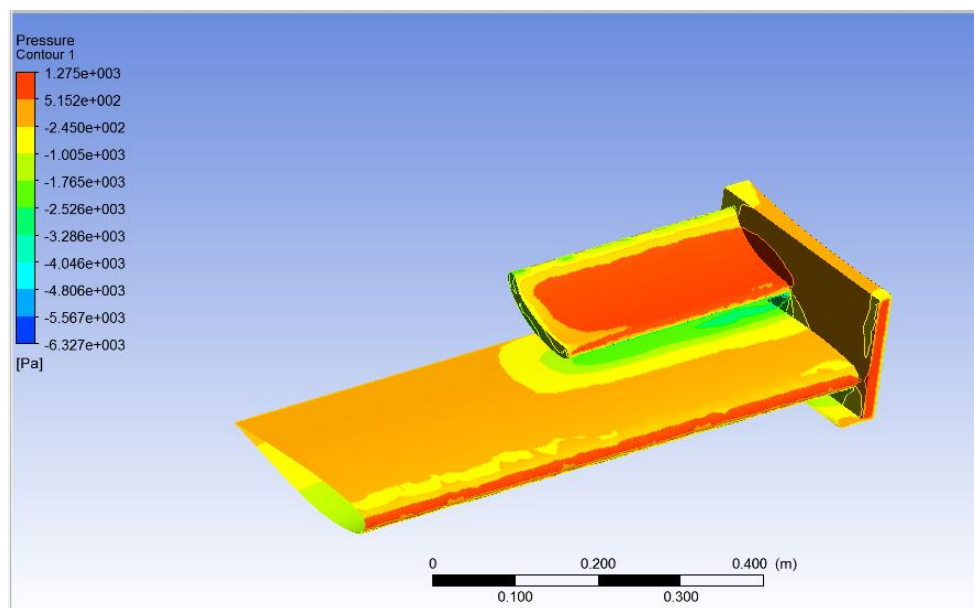


Figura 5.4.1.3: Distribució de pressions absolutes. (Pa)

Observem que les parts en vermell i taronja són les que suporten una major pressió. Algunes d'aquestes zones com el caire d'atac del perfil alar o la part frontal de l'*endplate* només fan que augmenti la força de *drag*. D'altres zones amb alts gradients de pressió com la part superior del flap tenen la funció d'aportar *downforce* al model,

però al mateix temps també augmenten en gran mesura la força de resistència a l'avanç.

S'observa també com, pel principi de Bernoulli, en les zones on hi ha alts gradients de velocitat la pressió és més baixa. Aquestes zones es situen a la part inferior del flap, on la reducció d'àrea fa augmentar la velocitat del flux d'aire, i a la part inferior del perfil alar, on l'aire ha de recórrer més distància que per la part superior, cosa que fa augmentar la seva velocitat i baixar la seva pressió. Aquesta depressió originada sota del perfil alar és el que també aporta gran *downforce* a l'estructura, ja que atrau el cotxe cap al terra. Aquests fets es poden visualitzar en la següent imatge, que representa la distribució de pressions en el perfil alar.

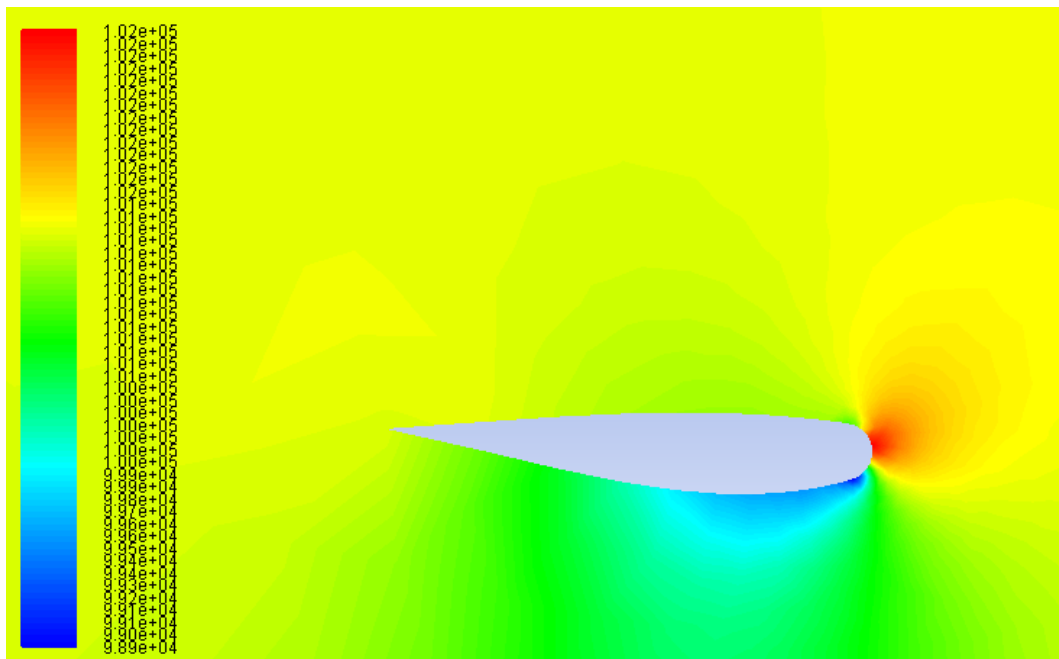


Figura 5.4.1.4: Distribució de pressions absolutes en el perfil alar. (Pa)

En la imatge anterior (*Figura 5.4.1.4*) també es pot observar el punt d'estancament en el perfil alar, zona on el flux d'aire incident impacta i es bifurca (zona en vermell). És per tant lògic que les pressions màximes en el model se situïn en aquesta zona.

A continuació es mostra la representació dels vectors velocitat a la cara de simetria:

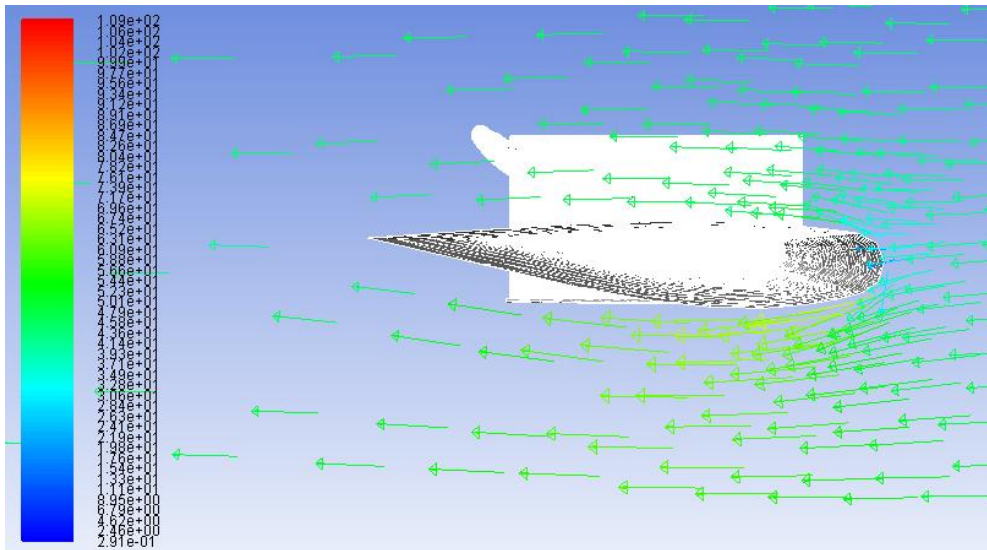


Figura 5.4.1.5: Vectors velocitat al voltant del perfil alar.(m/s)

Tal com veiem a la *Figura 5.4.1.5*, el flux d'aire circulant per la part inferior del perfil alar circula més ràpidament que per la part superior. També s'observa el punt d'estancament en el caire d'atac, on la velocitat es quasi nul·la (color blau). Al tractar-se d'un model amb un angle d'incidència de 0° , és comprensible que no s'observi amb claredat el desprendiment de la capa límit.

Finalment, a les figures 5.4.1.6 i 5.4.1.7 es pot observar el recorregut de les partícules d'aire al voltant de l'aleró.

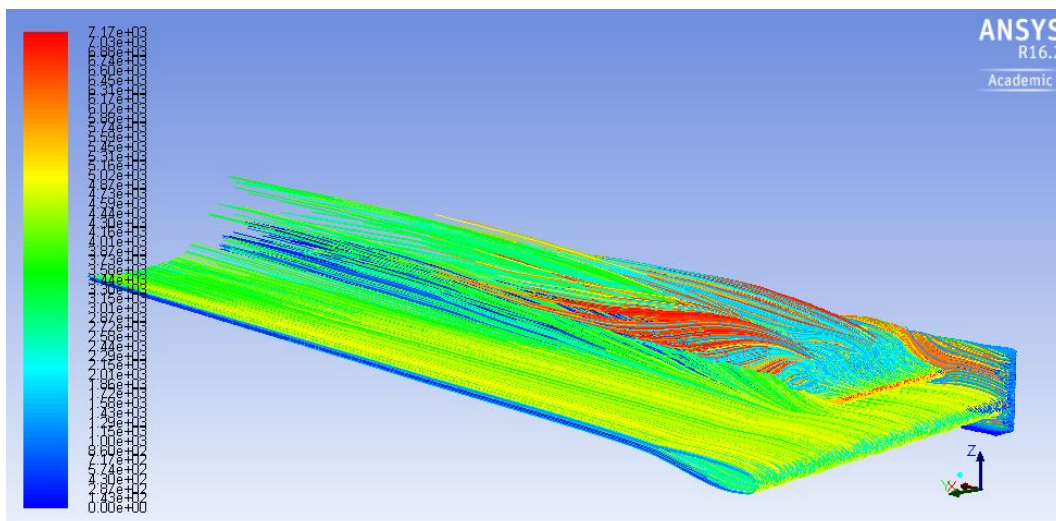


Figura 5.4.1.6: Pathlines. (Particle variables)

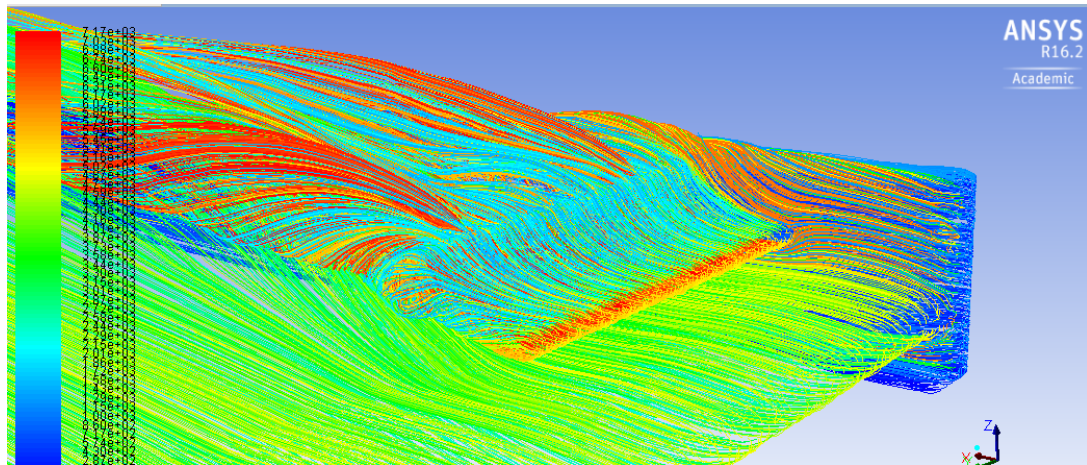


Figura 5.4.1.7: Flap pathlines en detall. (Particle variables)

Tal com s'observa a la *Figura 5.4.1.7* es veu com l'aire, degut a la diferència de pressió entre la part superior i la part inferior del flap, circula de la seva part superior a l'inferior. Això genera una turbulència en forma d'espiral a la part posterior de l'aleró, tal com s'observa a la *Figura 5.4.1.8*.

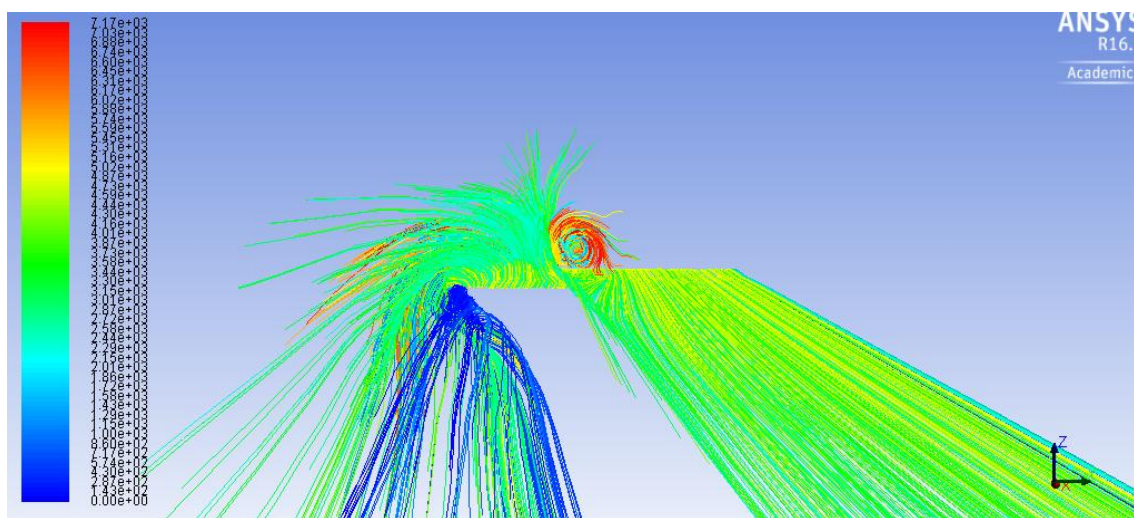


Figura 5.4.1.8: Pathlines - Detall de la part posterior. (Particle variables)

Aquesta turbulència fa augmentar la força de resistència a l'avanç, cosa que no ens interessa. Per solucionar aquest problema afegirem un endplate al flap i tornarem a simular el model per observar les diferències en els resultats obtinguts.

5.4.2 Model 0° amb endplate en el flap

En aquest model, tal com s'ha comentat en l'apartat anterior, s'ha afegit un endplate al flap per tal d'impedir que el flux d'aire passi de la part superior del flap a la part inferior i així reduir la força de resistència a l'avanç generada. El model resultant ha estat el que es mostra a la següent imatge:

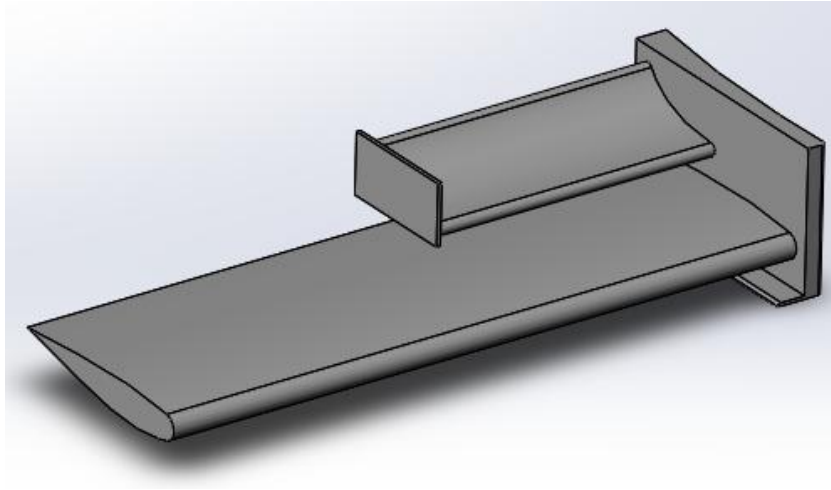


Figura 5.4.2.1: Model 0° amb endplate al flap.

Seguint els mateixos passos explicats anteriorment, duem a terme la simulació per aquest model per tal d'observar si realment el coeficient de *drag* es veu reduït amb aquest canvi i quines són les diferències més substancials.

En les següents imatges observem el mallat per aquest model:

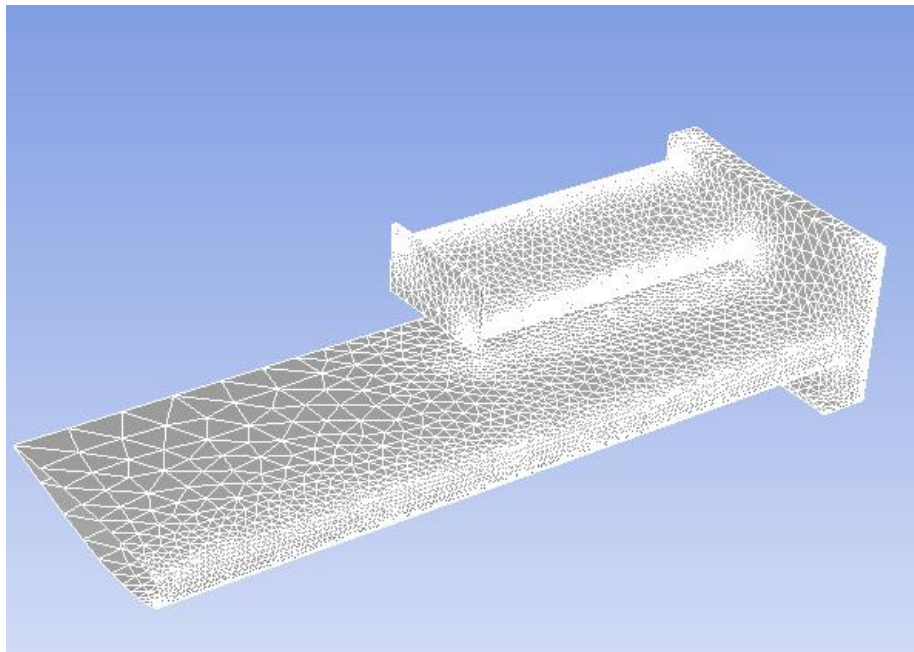


Figura 5.4.2.2: Mallat amb Span Angle Center a Fine.

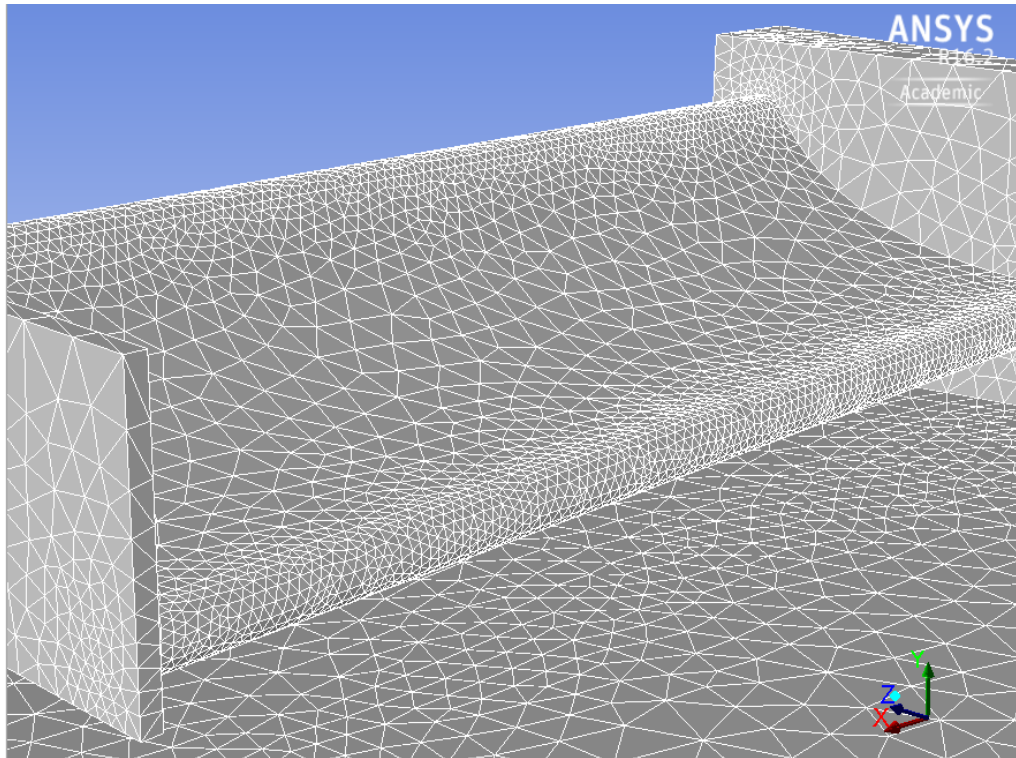


Figura 5.4.2.3: Mallat en detall.

Els resultats numèrics obtinguts han estat els següents:

	C_L	C_D	F_D (N)	F_L (N)	EA
Model 0° amb endplate al flap	-1,708	0,283	80,24	428,87	6,037

Taula 5.4.2.1: Valors numèrics dels coeficients i forces aerodinàmiques pel Model 0° amb endplate al flap.

En la següent taula ho comparem amb els resultats del model anterior:

	C_L	C_D	F_D (N)	F_L (N)	EA
Model 0 °	-1,649	0,322	91,29	414,31	5,125
Model 0° amb endplate al flap	-1,708	0,283	80,24	428,87	6,037

Taula 5.4.2.2: Comparació amb els resultats obtinguts en el model anterior.

Comparant els resultats obtinguts pel Model 0° sense *endplate* i amb *endplate* veiem que tal com s'esperava el C_D ha disminuït, ja que com s'observa a la Figura 5.4.2.4, gràcies a l'*endplate* s'ha pogut alleujar el vòrtex que el flux d'aire ocasionava en la part lliure del flap. Això no impedeix que segueixin apareixent turbulències en altres parts posteriors del flap, ocasionades per l'elevat grau d'inclinació d'aquest i els gradients de pressió originats entre la part superior i inferior.

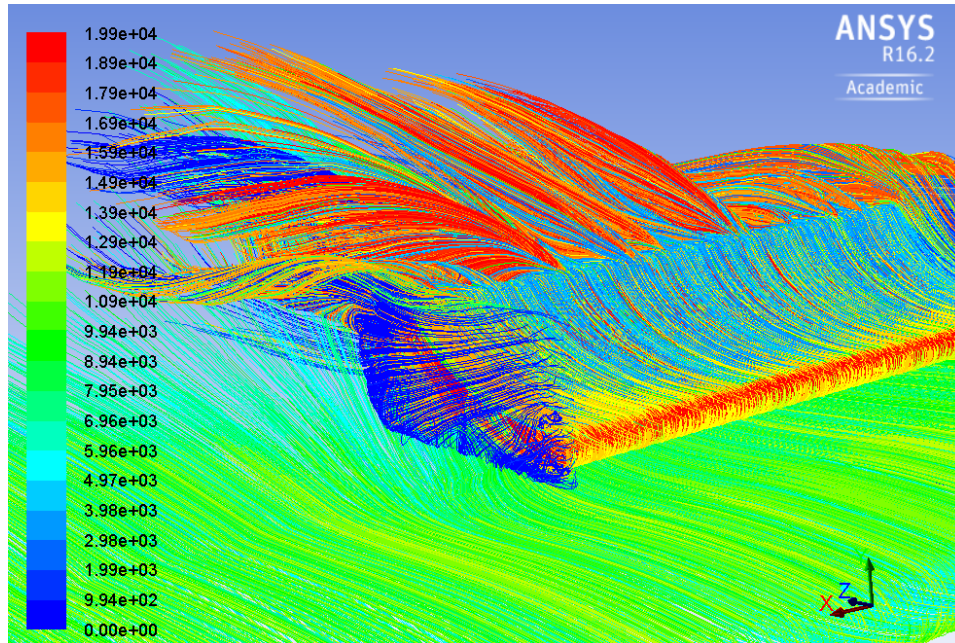


Figura 5.4.2.4: Flap pathlines en detall. (Particle variables)

Com amb l'ajuda de l'*endplate* el flux d'aire és conduït d'una forma més neta i per tant incideix millor en el flap, és lògic que el coeficient de sustentació s'hagi vist també incrementat.

En la següent imatge observem la distribució de pressions per aquest model:

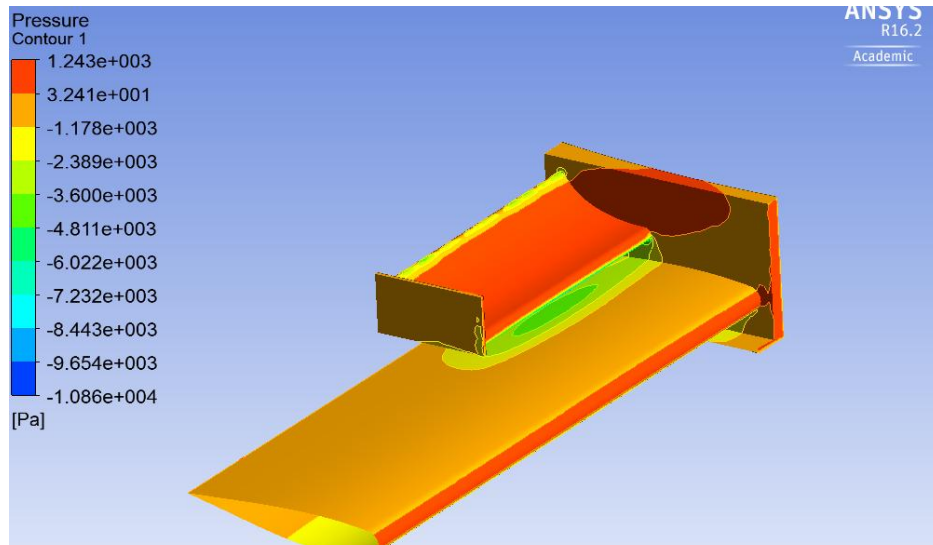


Figura 5.4.2.5: Distribució de pressions absolutes.(Pa)

En la Figura 5.4.2.5 observem com a l'incorporar l'*endplate*, el flux d'aire circulant pel flap és major i fa augmentar la pressió a la part interior de l'*endplate* de tot el conjunt. Observem en la següent figura una imatge en detall.

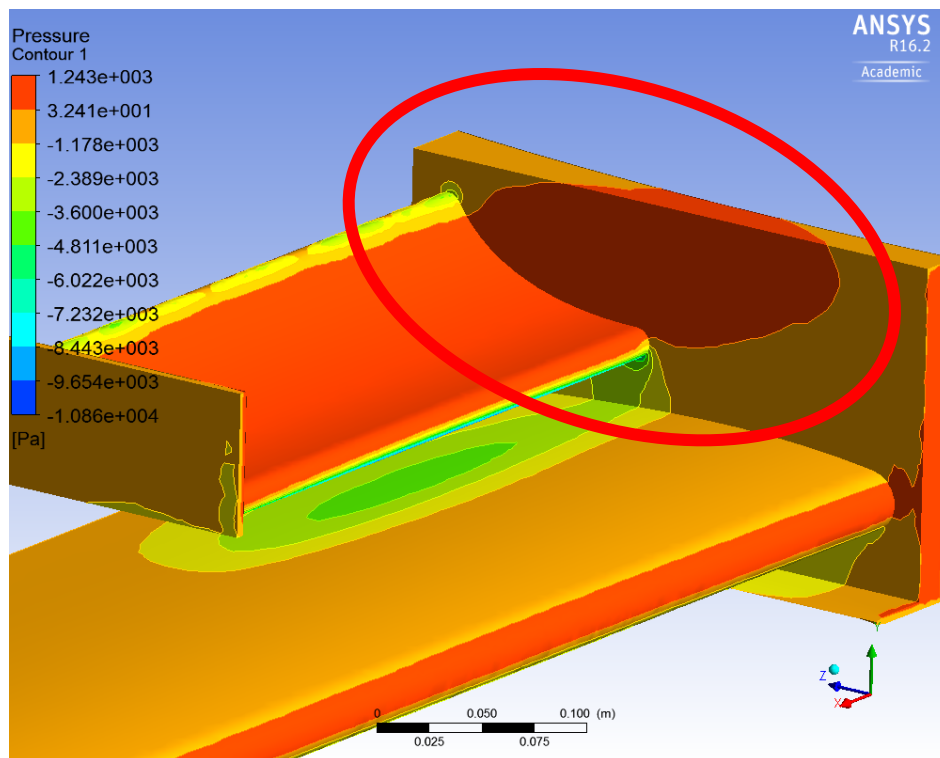


Figura 5.4.2.6: Distribució de pressions absolutes. Detall de l'*endplate* de tot el conjunt.
(Pa)

En la següent imatge es poden observar la distribució de pressions absolutes al voltant del perfil alar i el flap. Es veu de forma clara el punt d'estancament en el perfil alar, on

la pressió és màxima. També observem com, degut a la reducció d'àrea, el flux circulant entre el flap i el perfil alar augmenta la seva velocitat i per tant, pateix una gran depressió.

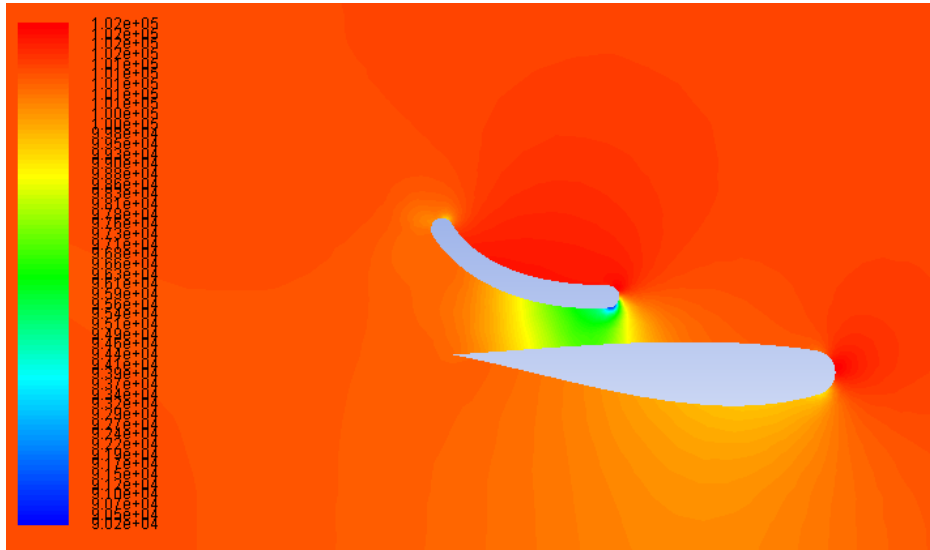


Figura 5.4.2.7: Distribució de pressions absolutes en el flap i el perfil alar. (Pa)

Entenent la turbulència com una fluctuació de la velocitat i donat que l'angle d'incidència del perfil alar és nul, en la Figura 5.4.2.8 s'observa com l'energia cinètica turbulenta en la part posterior del perfil alar no és alarmant (ordre baix).

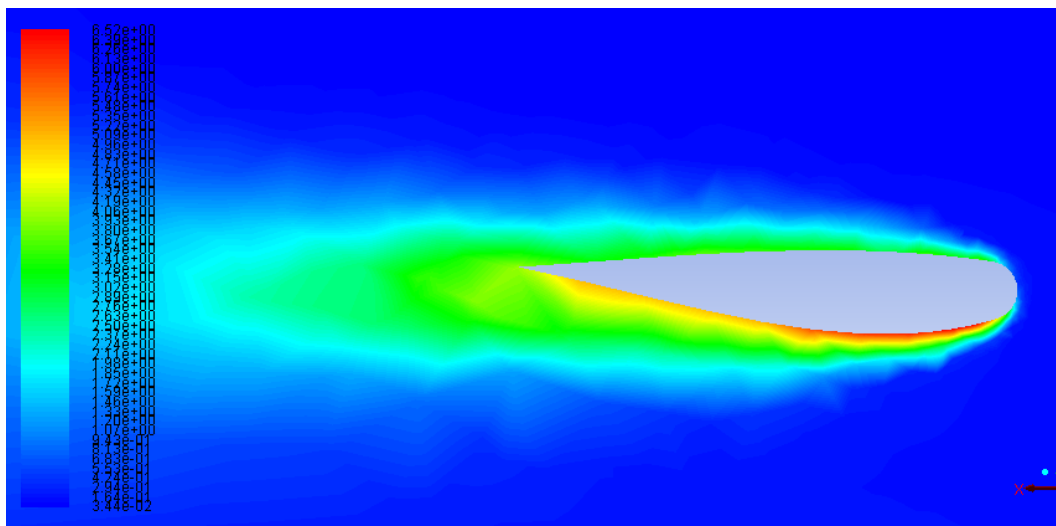


Figura 5.4.2.8: Energia cinètica turbulenta al voltant del perfil alar. (m^2/s^2)

En la Figura 5.4.2.9 s'observa com l'energia cinètica turbulenta en l'estela que deixa anar el flap és més significativa que l'energia cinètica turbulenta provocada pel propi perfil alar. Aquesta turbulència es podria solucionar afegint un Flap de Gurney a la part final del flap.

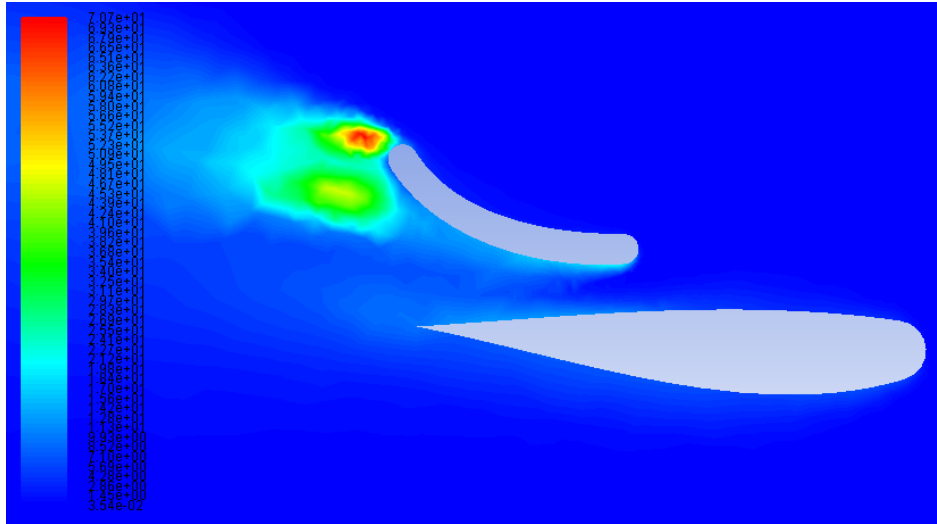


Figura 5.4.2.9: Energia cinètica turbulenta al voltant del flap i el perfil alar. (m^2/s^2)

5.4.3 Model 2,5 °

A partir d'aquest punt analitzarem el model d'aleró presentat en el punt anterior (Model 0 ° amb endplate al flap) amb diversos angles d'incidència del perfil alar. En cada cas analitzarem els resultats obtinguts i finalment escollirem el model òptim.

Un cop realitzada la variació d'angle del perfil alar de 0° a 2,5° procedim a analitzar-lo amb el *Fluent* seguint els mateixos passos explicats anteriorment. Els resultats obtinguts han estat els següents:

	C_L	C_D	F_D (N)	F_L (N)	EA
Model 2,5 °	-2,25	0,316	89,95	638,16	7,12

Taula 5.4.3.1: Valors numèrics dels coeficients i forces aerodinàmiques pel Model 2,5°.

En la següent taula ho comparem amb els resultats del model anterior:

	C_L	C_D	F_D (N)	F_L (N)	EA
Model 0° amb endplate al flap	-1,708	0,283	80,24	428,87	6,037
Model 2,5 °	-2,25	0,316	89,95	638,16	7,12

Taula 5.4.3.2: Comparació amb els resultats obtinguts en el model anterior.

Tal com observem a la *Taula 5.4.3.2*, la variació dels $2,5^\circ$ en l'angle d'atac del perfil alar ha provocat que el C_L hagi augmentat un 31,73 % respecte al model anterior, fet completament lògic tenint en compte que al variar l'angle d'atac, la distància que ha de recórrer el flux d'aire per la part inferior del perfil alar (extradós) és més gran, per tant aquest es veu obligat a circular més ràpid, cosa que origina gradients de pressió i velocitat més elevats. A la següent imatge s'observa com la pressió sota el perfil alar és més baixa que en els models anteriors (s'ha tingut en compte el canvi d'escala entre ambdues gràfiques).

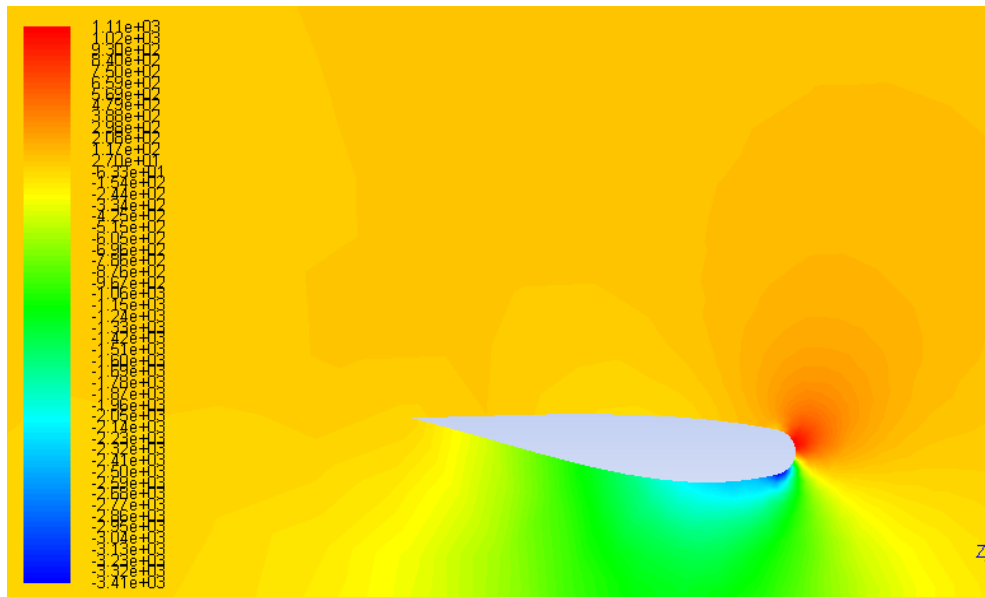


Figura 5.4.3.1: Distribució de pressions absolutes en el perfil alar. (Pa)

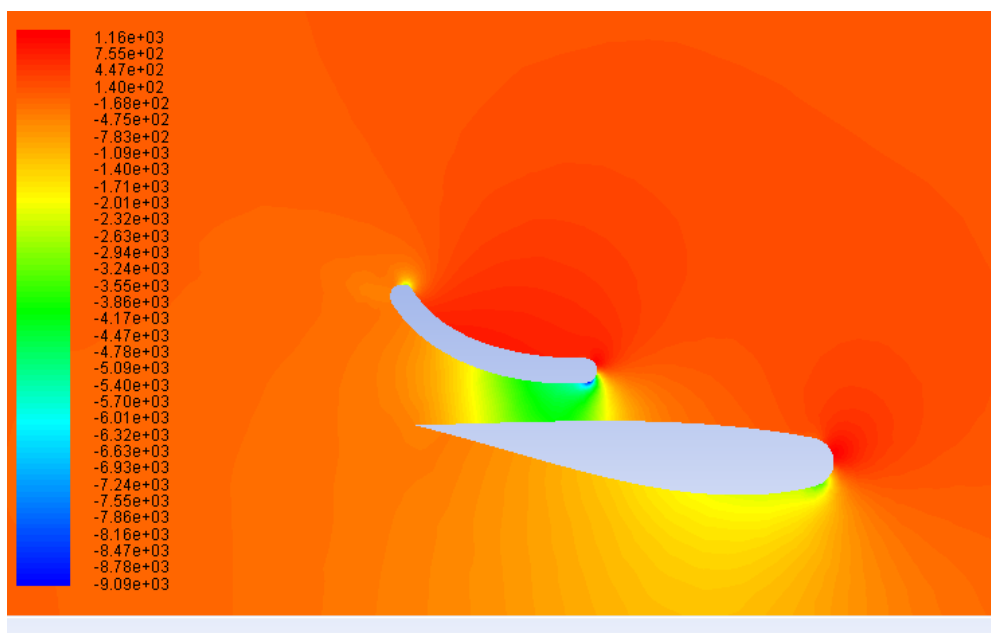


Figura 5.4.3.2: Distribució de pressions absolutes en el flap i el perfil alar. (Pa)

S'observa també com la velocitat ha augmentat en la part inferior del perfil alar respecte al primer model:

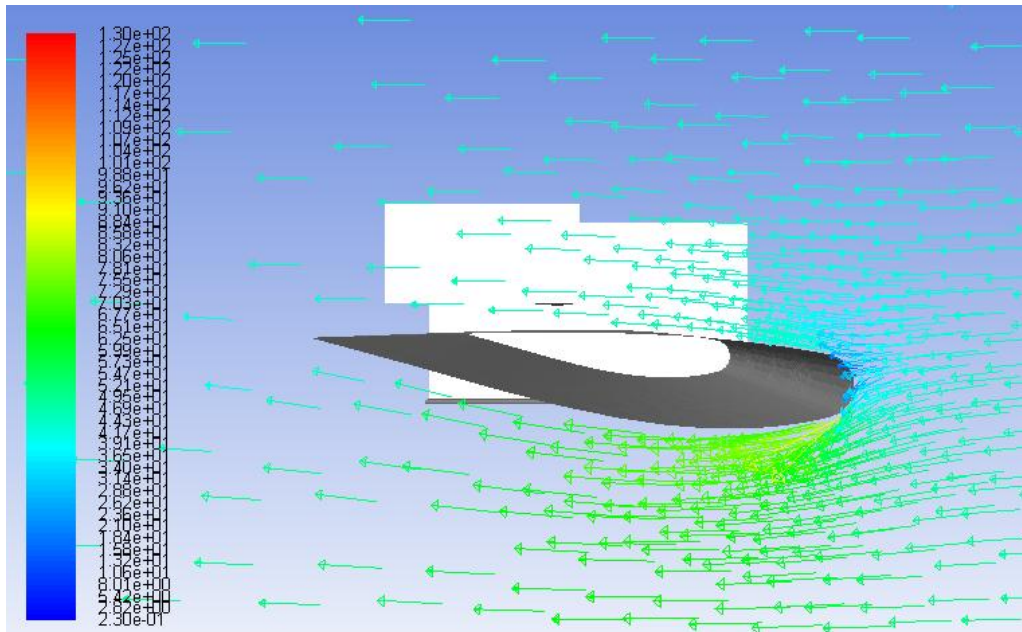


Figura 5.4.3.3: Vectors velocitat en el pla de simetria.(m/s)

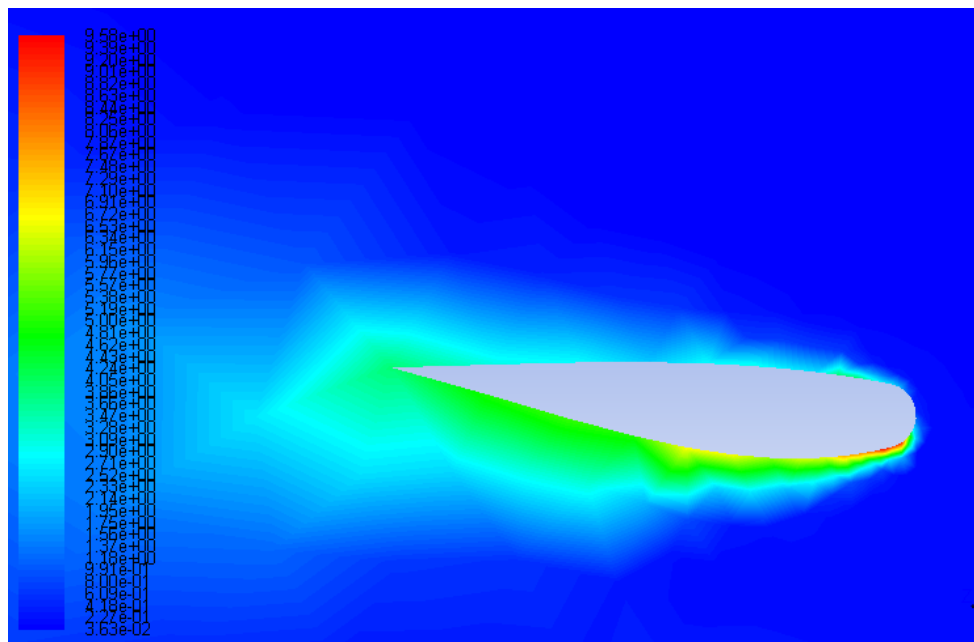


Figura 5.4.3.4: Energia cinètica turbulenta al voltant del perfil alar. (m^2/s^2)

5.4.4 Model 5 °

A continuació s'ha analitzat l'aleró amb un angle d'incidència del perfil alar de 5°. Els resultats han estat els següents:

	C_L	C_D	F_D (N)	F_L (N)	EA
Model 5 °	-3,057	0,3806	107,95	767,69	8,032

Taula 5.4.4.1: Valors numèrics dels coeficients i forces aerodinàmiques pel Model 5°.

En la següent taula ho comparem amb els resultats del model anterior:

	C_L	C_D	F_D (N)	F_L (N)	EA
Model 2,5°	-2,25	0,316	89,95	638,16	7,12
Model 5 °	-3,057	0,381	107,95	767,69	8,032

Taula 5.4.4.2: Comparació amb els resultats obtinguts en el model anterior.

Es pot observar que l'augment de l'angle d'atac, a més de provocar un augment en el coeficient de *lift*, també augmenta el coeficient de *Drag*. Aquest fet es deu a què a l'anar augmentant l'àrea frontal de contacte amb el flux d'aire incident, la pressió sobre l'aleró és més gran, generant per tant més resistència a l'avanç. El fet d'haver-hi més zona de contacte entre el flux d'aire i l'aleró també provoca que la força de resistència a l'avanç per fricció augmenti.

També veiem com l'eficiència aerodinàmica es veu incrementada en un 12,81%.

En la *Figura 5.4.4.1* s'observa com, poc a poc, la depressió en la part de l'extradós del perfil alar va augmentant.

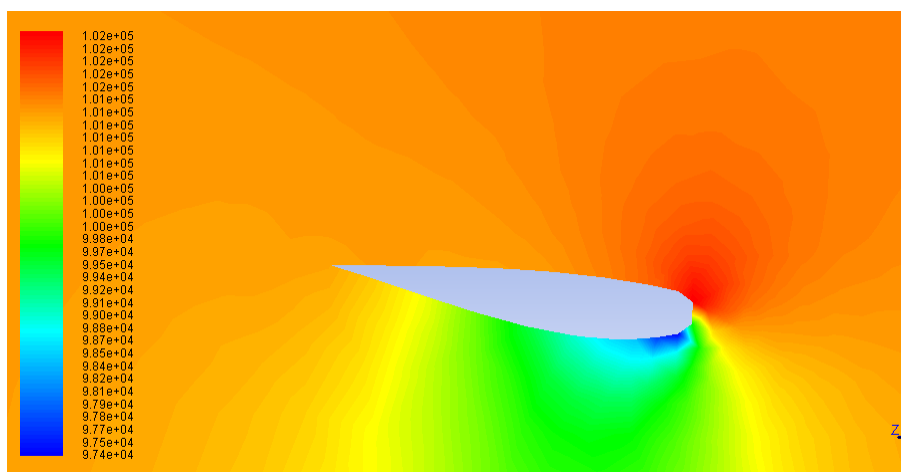


Figura 5.4.4.1: Distribució de pressions absolutes en el perfil alar. (Pa)

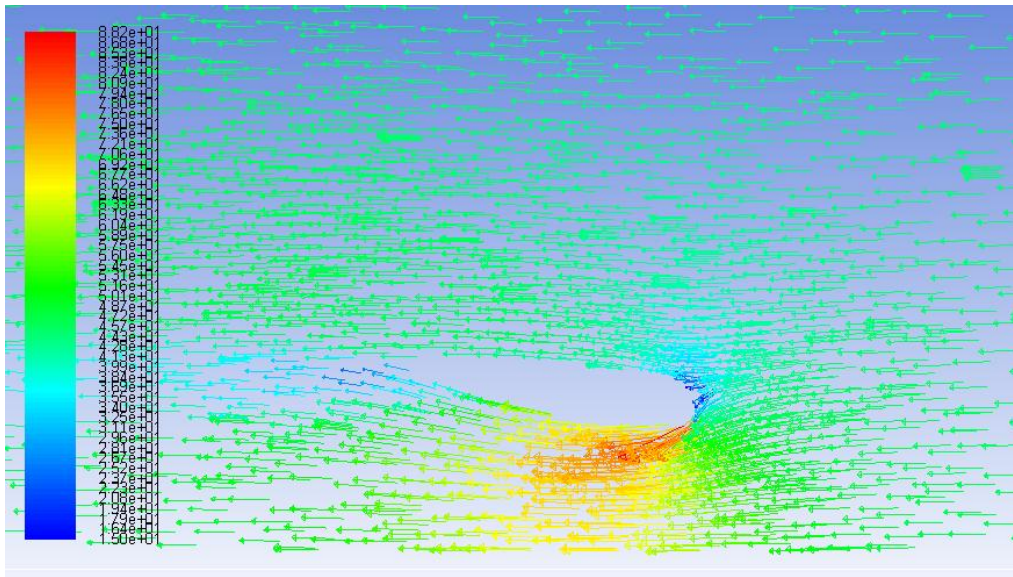


Figura 5.4.4.2: Vectors velocitat en el pla de simetria. (m/s)

En la Figura 5.4.4.3 observem com l'estretament de la zona entre el flap i el perfil alar, degut a la reducció d'àrea, provoca l'augment de la velocitat del flux d'aire passant per aquesta zona, i, pel principi de Bernouilli, la disminució de la seva pressió. Aquesta disminució de la pressió és visible en la Figura 5.4.4.4.

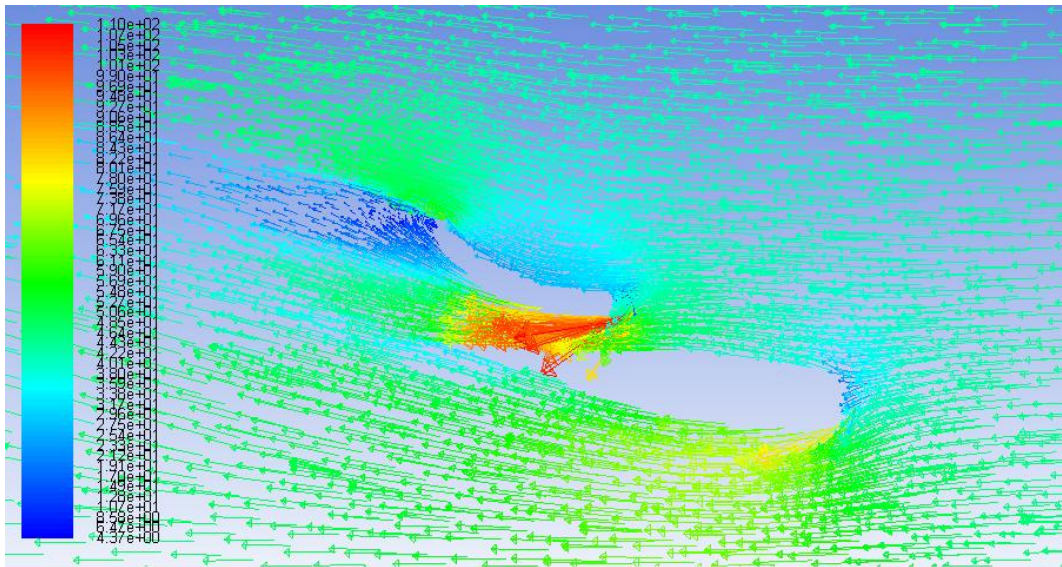


Figura 5.4.4.3: Vectors velocitat en el flap i el perfil alar. (m/s)

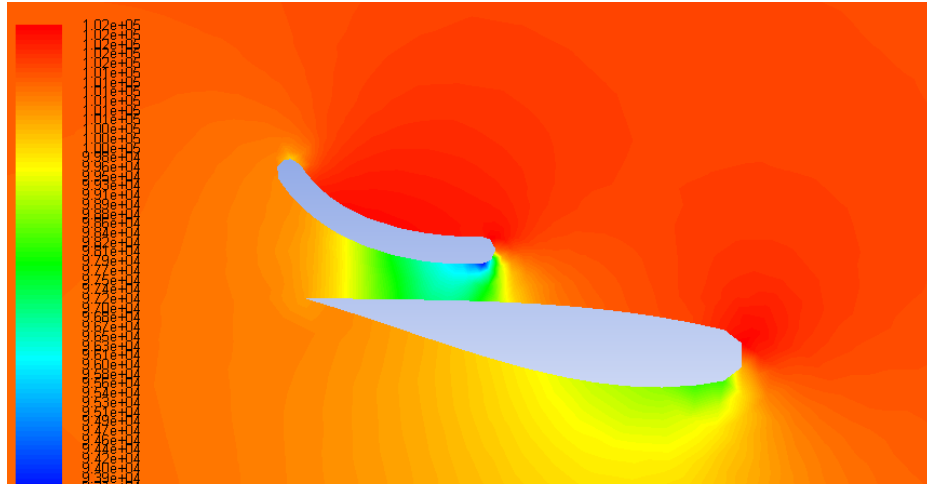


Figura 5.4.4.4: Distribució de pressions absolutes en el flap i el perfil alar. (Pa)

En la Figura 5.4.4.3 abans presentada també s'observa com les línies de corrent en la part superior i posterior del flap varien lleugerament la seva direcció. Això és degut a la turbulència que aquest element genera a la seva part posterior, fet visible en el gràfic de turbulències en la Figura 5.4.4.5.

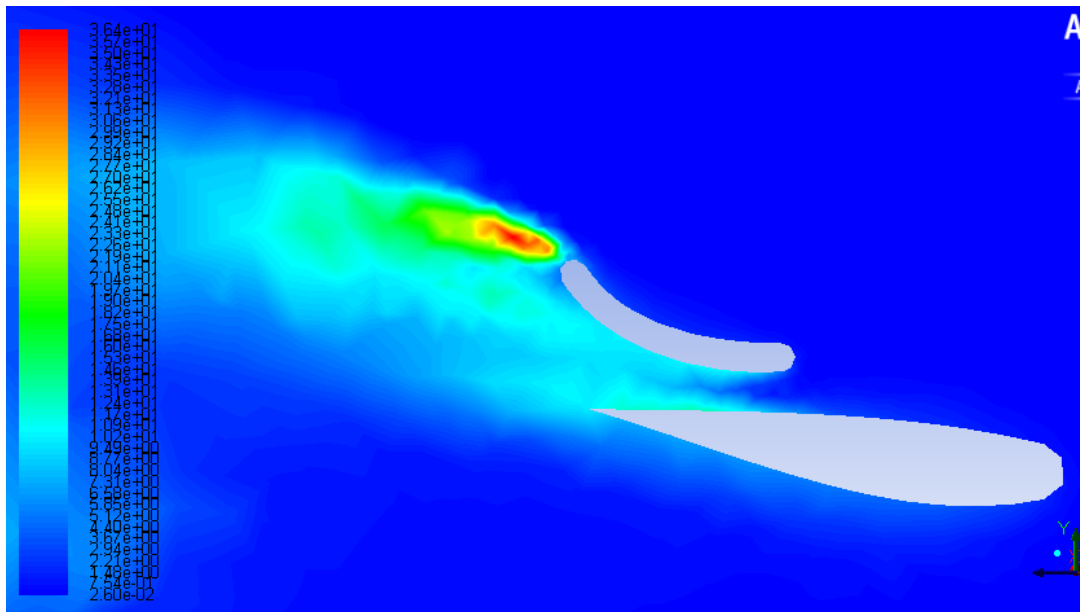


Figura 5.4.4.5: Energia cinètica turbulenta al voltant del flap i el perfil alar. (m^2/s^2)

Tal com s'ha comentat en l'anterior simulació, aquesta turbulència originada a la part posterior del flap podria ser atenuada afegint un Flap de Gurney al seu extrem. Tot i això, després d'afegir el Flap de Gurney i simular el model, els resultats de la simulació no convergien, de forma que no s'han pogut obtenir uns resultats coherents. És per aquest fet que s'ha decidit seguir les simulacions sense introduir aquest Flap de Gurney.

En la següent imatge observem com l'energia cinètica turbulenta que provoca el perfil alar ha augmentat respecte els models anteriors:

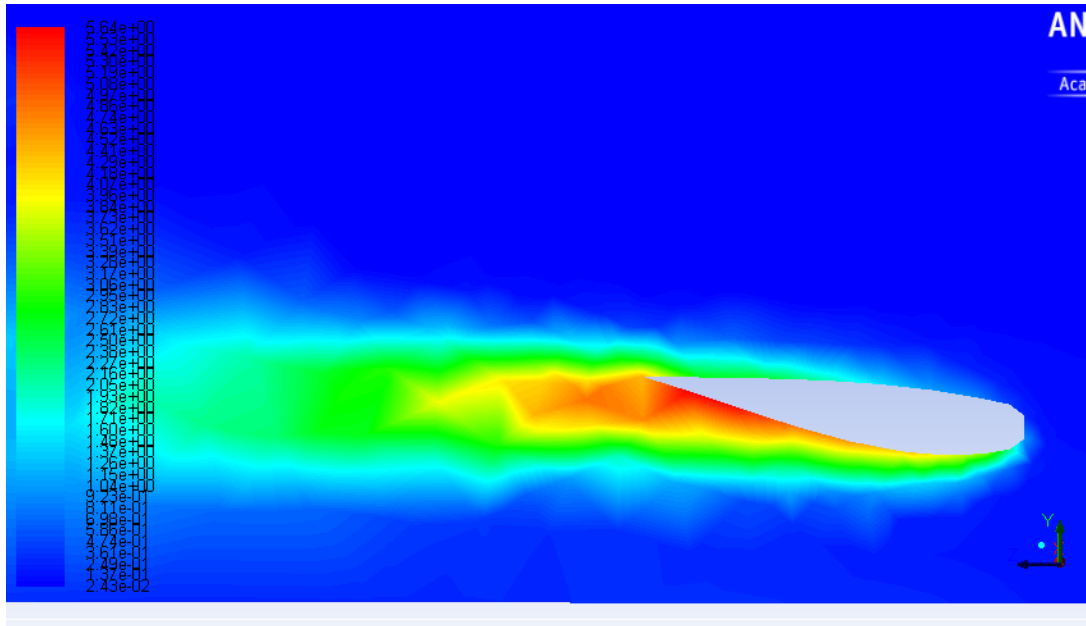


Figura 5.4.4.6: Energia cinètica turbulenta al voltant del perfil alar. (m^2/s^2)

5.4.5 Model 7,5 °

A continuació s'ha analitzat l'aleró amb un angle d'incidència del perfil alar de 7,5°. Els resultats han estat els següents:

	C_L	C_D	F_D (N)	F_L (N)	EA
Model 7,5 °	-3,280	0,518	153,09	823,69	6,33

Taula 5.4.5.1: Valors numèrics dels coeficients i forces aerodinàmiques pel Model 7,5°.

En la següent taula ho comparem amb els resultats del model anterior:

	C_L	C_D	F_D (N)	F_L (N)	EA
Model 5°	-3,057	0,381	107,95	767,69	8,032
Model 7,5 °	-3,280	0,518	153,09	823,69	6,33

Taula 5.4.5.2: Comparació amb els resultats obtinguts en el model anterior.

En la Taula 5.4.5.2 s'observa com, a l'anar augmentant l'angle d'atac, els coeficients C_L i C_D segueixen augmentant. Pel que fa l'eficiència aerodinàmica, veiem que ha disminuït un 21,2%, fet degut al major increment proporcional del C_D que del C_L .

Pel que fa la distribució de pressions, en la *Figura 5.4.5.2* és visible com la pressió de la zona entre el flap i l'aleró ha disminuït respecte l'anterior model (*Figura 5.4.4.4*). Aquest fet és degut a la disminució d'àrea disponible pel flux d'aire per passar entre els dos elements. Aquesta disminució de pressió explica, en part, l'augment del C_L en el model.

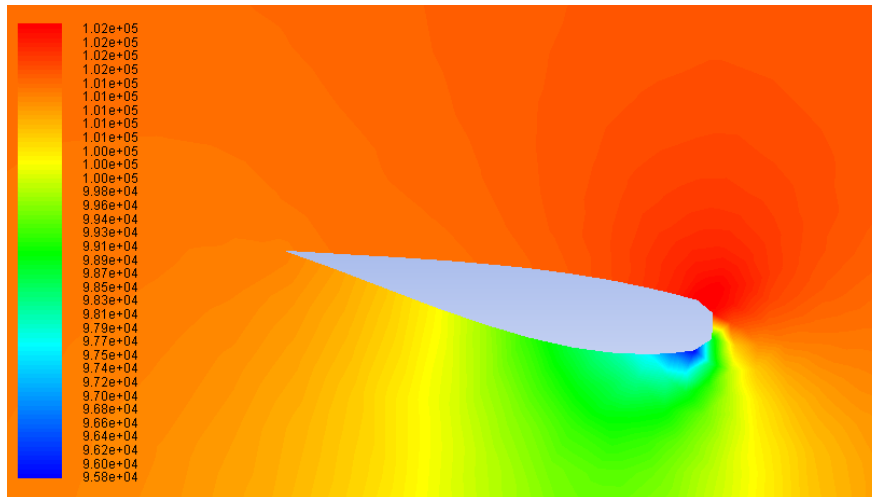


Figura 5.4.5.1: Distribució de pressions absolutes en el perfil alar. (Pa)

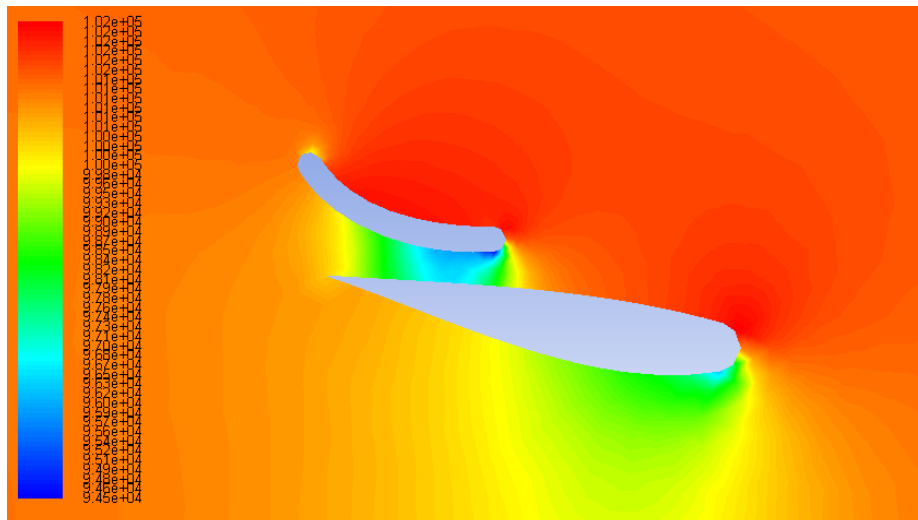


Figura 5.4.5.2: Distribució de pressions absolutes en el flap i el perfil alar. (Pa)

L'augment de la depressió tant en la zona entre el flap i el perfil alar, com en la zona entre el perfil alar i el terra son provocades per l'augment de la velocitat del flux d'aire en aquestes zones. Aquest increment de la velocitat és visible en les *Figures 5.4.5.3 i 5.4.5.4*.

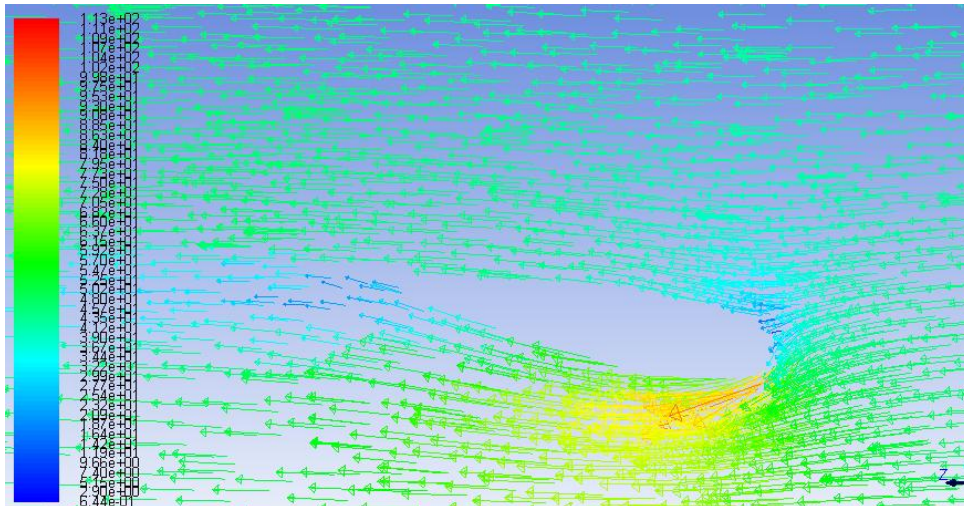


Figura 5.4.5.3: Vectors velocitat en el perfil alar. (m/s)

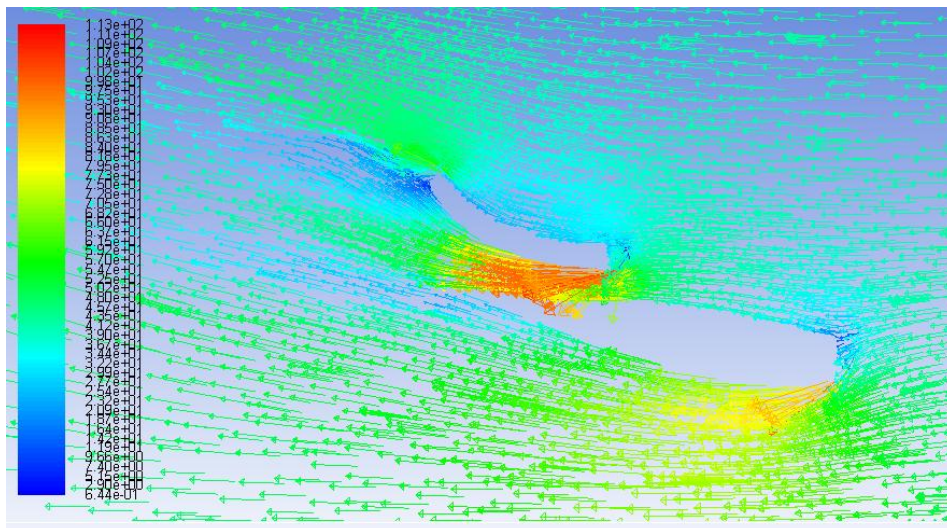


Figura 5.4.5.4: Vectors velocitat en el flap i el perfil alar.(m/s)

En les Figures 5.4.5.5 i 5.4.5.6 observem la distribució de l'energia cinètica turbulenta per aquest model.

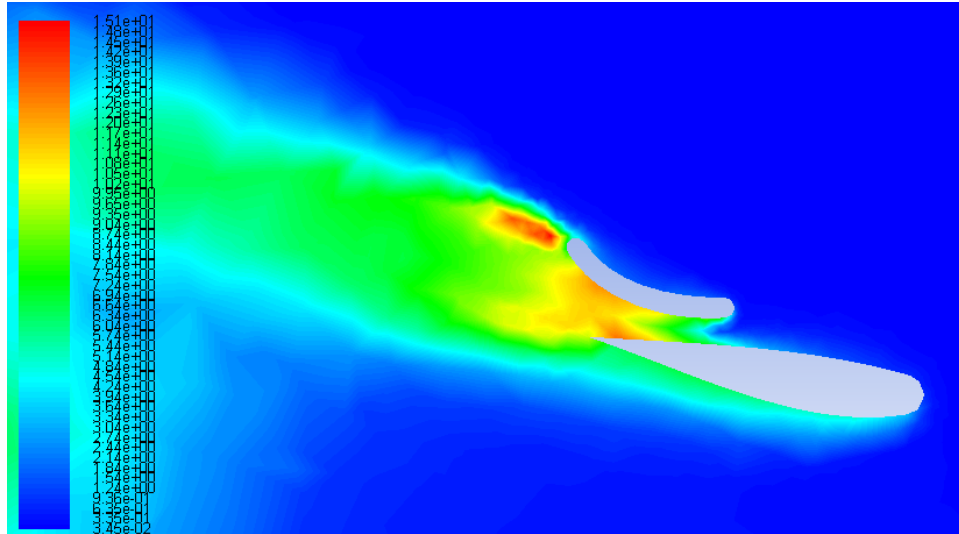


Figura 5.4.5.5: Energia cinètica turbulenta al voltant del flap i el perfil alar. (m^2/s^2)

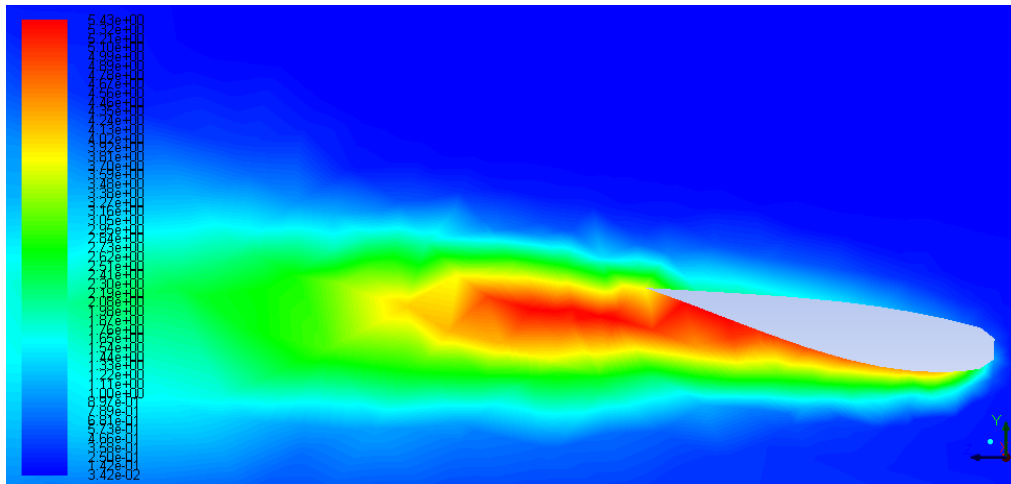


Figura 5.4.5.6: Energia cinètica turbulenta al voltant del perfil alar. (m^2/s^2)

5.4.6 Model 10°

Alhora de realitzar el disseny 3D d'aquest model, al variar l'angle d'atac del perfil alar a 10° va resultar que aquest xocava amb el flap. Per tal d'arreglar aquest problema es va desplaçar el flap 13 mm en sentit vertical ascendent. Els resultats de la simulació han estat els següents:

	C_L	C_D	F_D (N)	F_L (N)	EA
Model 10°	-3,639	0,627	196,13	913,85	5,804

Taula 5.4.6.1: Valors numèrics dels coeficients i forces aerodinàmiques pel Model 10°.

En la següent taula ho comparem amb els resultats del model anterior:

	C_L	C_D	F_D (N)	F_L (N)	EA
Model 7,5°	-3,280	0,518	153,09	823,69	6,33
Model 10°	-3,639	0,627	196,13	913,85	5,804

Taula 5.4.6.2: Comparació amb els resultats obtinguts en el model anterior.

Observem com segueix la dinàmica adoptada fins ara. Pel que fa l'eficiència aerodinàmica, aquesta ha disminuït un 8,31%.

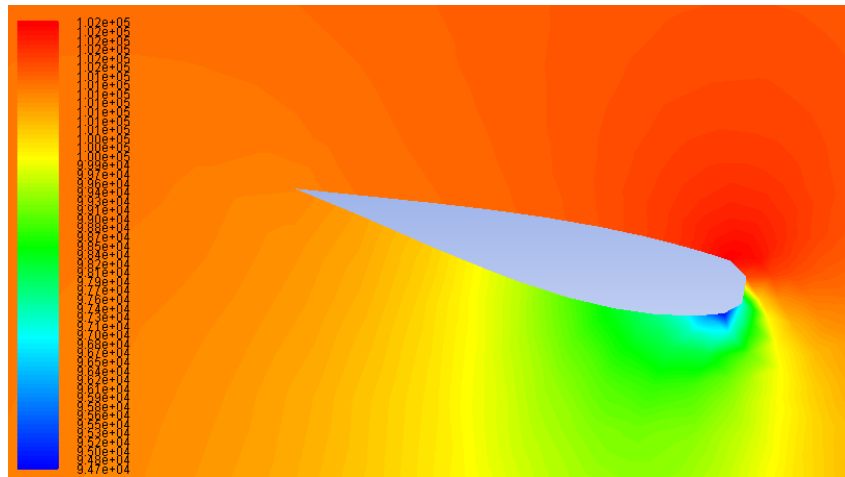


Figura 5.4.6.1: Distribució de pressions absolutes en el perfil alar. (Pa)

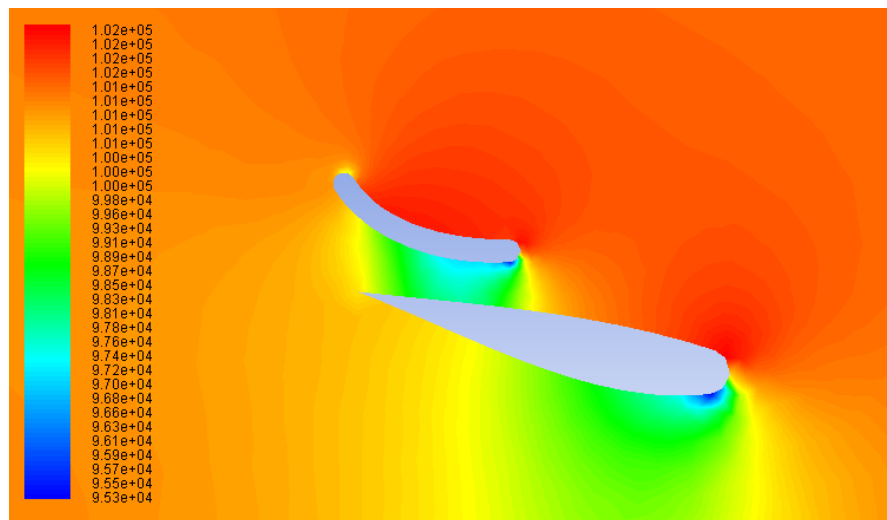


Figura 5.4.6.2: Distribució de pressions absolutes en el flap i el perfil alar. (Pa)

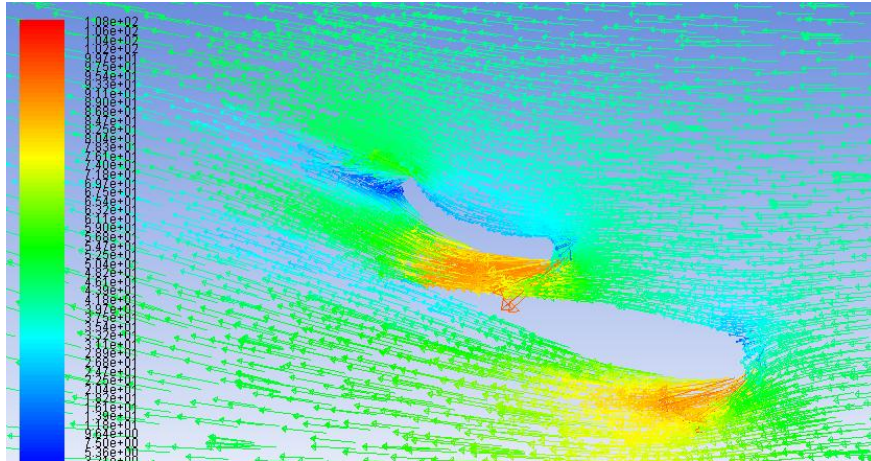


Figura 5.4.6.3: Vectors velocitat en el flap i el perfil alar. (m/s)

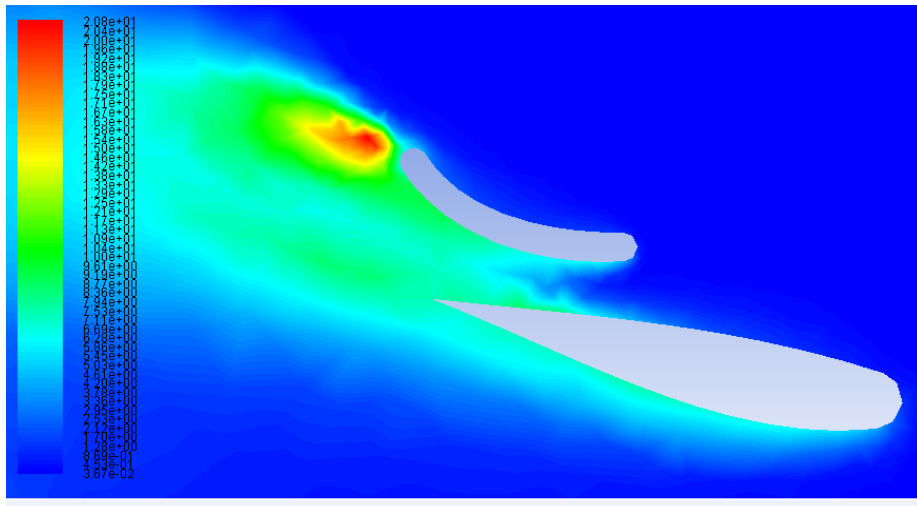


Figura 5.4.6.4: Energia cinètica turbulenta al voltant del flap i el perfil alar. (m^2/s^2)

Tal com s'esperava, en la *Figura 5.4.6.5* s'observa com la inclinació de 10° del perfil alar fa augmentar en gran mesura la zona turbulenta a la part posterior de l'aleró davanter en comparació amb la zona turbulenta generada en els models anteriors. Aquest fet és un dels que fa augmentar més la resistència a l'avanç del model.

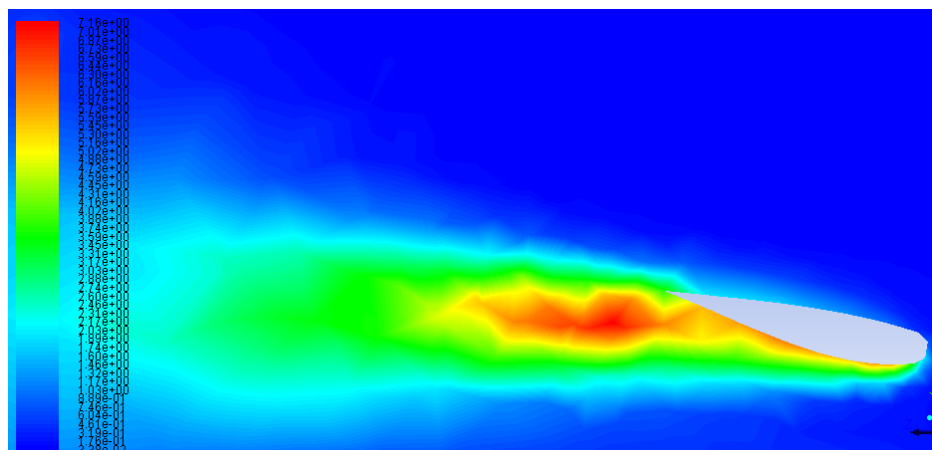


Figura 5.4.6.5: Energia cinètica turbulenta al voltant del perfil alar. (m^2/s^2)

6. Comparativa dels resultats numèrics obtinguts

Un cop analitzats tots els models, durem a terme un resum dels resultats obtinguts per escollir finalment quin és el model que ofereix millors prestacions. En la *Taula 6.1* es poden observar els resultats obtinguts per tots els models analitzats.

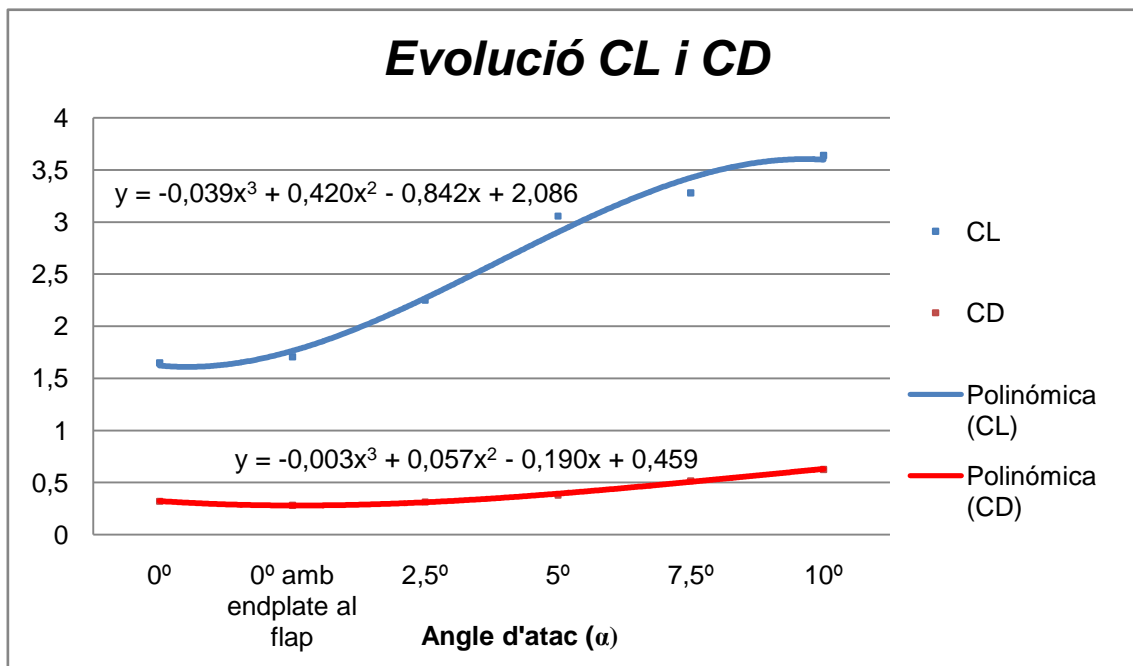
MODEL	C_L	C_D	F_D (N)	F_L (N)	EA
0°	-1,649	0,322	91,29	414,31	5,13
0° amb endplate al flap	-1,708	0,283	80,24	428,87	6,04
2,5°	-2,25	0,316	89,95	638,16	7,12
5°	-3,057	0,381	107,95	767,69	8,03
7,5°	-3,280	0,518	153,09	823,69	6,33
10°	-3,639	0,627	196,13	913,85	5,80

Taula 6.1: Resum dels resultats obtinguts en les simulacions.

En la *Taula 6.1* es pot comprovar que el model que ofereix una eficiència aerodinàmica més elevada és el **model amb un angle d'incidència de 5°**, amb un valor de 8,032, un 56,72% més alt que el de l'aleró inicial. Per tant, aquest és el model que escollirem com a òptim de tots els analitzats, amb un C_L de 3,057 i un C_D de 0,381. Com la majoria de modificacions s'han dut a terme en el perfil alar (variació de l'angle d'atac), és evident que l'addició de l'*endplate* en el flap afavoreix en l'eficiència aerodinàmica de tots els models, per aquest motiu s'ha deixat incorporat en totes les simulacions.

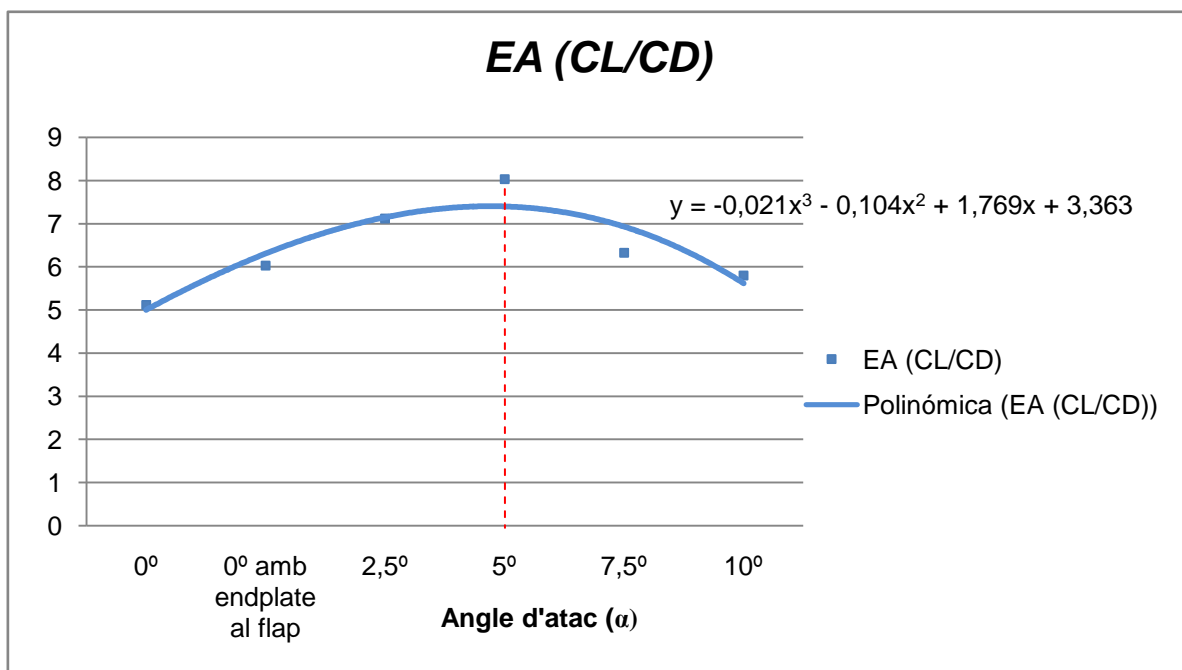
Tot i que el model òptim pel que fa l'eficiència aerodinàmica ha resultat ser el model amb un angle d'incidència de 5°, depenen del circuit on es competeixi interessarà un angle d'atac més gran o més petit, encara que això signifiqui una reducció de l'eficiència aerodinàmica del model. Si el circuit no té molts trams rectes, sinó que es basa en moltes corbes, com el de Mònaco, interessarà una gran càrrega aerodinàmica per poder agafar aquestes corbes amb més rapidesa, restant importància a la velocitat punta que pugui assolir el monoplaça, per tant optarem per un angle d'atac superior. En canvi, si el circuit on es competeix té molts trams rectes on s'interessa assolir grans velocitats puntes, com el de Monza, es voldrà minimitzar tot el possible el coeficient de *drag*, per tant s'adoptarà un angle d'atac inferior.

En la *Gràfica 6.1* s'observa l'evolució dels coeficients C_L i C_D a mesura que s'ha anat augmentant l'angle d'atac del perfil alar. Per tal de veure la tendència dels resultats s'ha realitzat una regressió polinòmica de 3^{er} grau, les equacions de les quals es mostren en la mateixa gràfica.



Gràfica 6.1: Evolució del CL i el CD en funció de l'angle d'atac (α).

Per últim, la Gràfica 6.2 mostra l'evolució de l'eficiència aerodinàmica en funció de l'angle d'incidència (α) adoptat en el perfil alar. S'observa que el punt màxim és en el qual l'angle d'incidència és de 5°, tal i com s'ha comentat anteriorment.



Gràfica 6.2: Evolució de l'eficiència aerodinàmica en funció de l'angle d'incidència (α).

7. Planificació temporal i costos

Tenint en compte que l'elaboració d'aquest treball s'ha realitzat conjuntament amb la realització de pràctiques curriculars en empresa (6 h/dia) i cursant dues assignatures troncales a la universitat, s'ha intentat aprofitar tot el temps disponible restant per tal de dur a terme un TFG amb cara i ulls i assolir tots els objectius plantejats a l'inici d'aquest. Per un cantó, la recerca i escrit dels conceptes teòrics del treball es van acabar la primera setmana d'Abril, molt a prop de l'entrega parcial. A partir de llavors es va realitzar el disseny 3D de l'aleró amb el programari *SolidWorks*. Un cop es va tenir el model 3D definitiu es van dur a terme les simulacions amb el programari *ANSYS Fluent*. Finalment, es van aconseguir tenir totes les simulacions enllestides cap a finals de Maig, per tal de deixar temps per estudiar els exàmens finals. L'anàlisi dels resultats i la redacció dels apartats complementaris del treball es van tenir enllestits l'última setmana de Maig, i es van deixar les dues primeres setmanes de Juny per tal d'acabar de polir els detalls. En la *Figura 7.1* observem la planificació del treball (*Diagrama de Gantt*).

	Març				Abril				Maig				Juny			
ACTIVITAT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Recerca i redactat de la documentació tècnica																
Creació del model 3D																
Modificació de la geometria + Simulacions																
Anàlisi dels resultats + Redacció																

Figura 7.1: Planificació del treball.

Com que no s'ha realitzat una maqueta física, els costos estimats per dur a terme aquest treball es centren bàsicament en l'obtenció de les llicències dels programaris emprats i el sou aplicat al projectista. Pel que fa al programari *SolidWorks*, s'ha utilitzat la versió estudiantil que ofereix la universitat, que va ser instal·lada en un ordinador portàtil. Per la realització de les simulacions s'ha utilitzat tant la versió estudiantil que ofereixen les aules informàtiques de la ETSEIB com la que ofereix *ANSYS* en la seva pàgina web, que va ser descarregada en un portàtil d'ús personal.

En la *Taula 7.1* es mostra un resum dels costos associats a la realització del treball. S'han comptabilitzat les hores de treball com a hores remunerades d'un enginyer treballant com a projectista, i no s'han tingut en compte costos tals com el lloguer del local on s'ha realitzat el projecte, la seva neteja o il·luminació.

RECURSOS HUMANOS				
Concepte	Cost [€]		Total [€]	
Projectista	Sou [€/h]	Temps [h]		
	30	270	8100 (1)	
SOFTWARE				
Concepte	Cost [€]	Vida útil [h]	Temps d'ús [h]	Amortització [€]
Llicència versió estudiantil SolidWorks 15	7000	3500	50	100
Llicència versió estudiantil ANSYS Fluent 16.2	19000	5200	230	840,38
Word 2007 (Microsoft Office)	140	∞	150	140
TOTAL [€]				1080,38 (2)
RECURSOS MATERIALES				
Concepte	Cost [€]	Vida útil [h]	Temps d'ús [h]	Amortització [€]
Ordinador portàtil	630	3800	290	48,08
Concepte				Cost [€]
Impressió i encuadernat del treball				50
TOTAL [€]				(3)
COSTOS TOTALES				
Concepte			TOTAL [€]	
Total abans d'impostos	(1)+(2)+(3)		9278,5 (4)	
I.V.A.	21% de (4)		1948,5 (5)	
Cost total del projecte	(4)+(5)		11.227 €	

Taula 7.1: Resum dels costos del treball.

En la *Figura 7.2* es visualitza el desglossament dels costos totals.

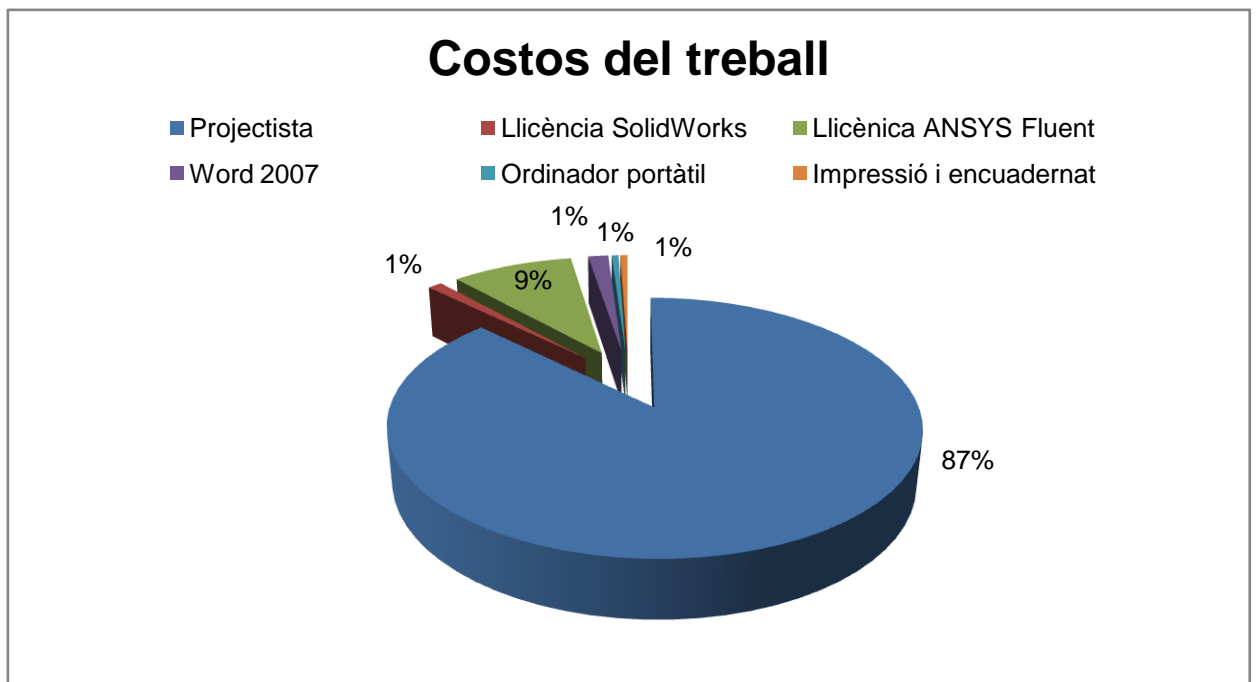


Figura 7.2: Desglossament dels costos totals.

8. Impacte mediambiental

El treball en si, a l'haver realitzat totes les simulacions amb un model virtual i no haver construït cap maqueta física, no ha tingut un impacte mediambiental significatiu. El principal efecte sobre el medi ambient ha estat el consum elèctric de l'ordinador portàtil, energia provinent de fonts de les quals gran part són combustibles fòssils.

En projectes com aquest, el més comú és fabricar una maqueta del model d'estudi i analitzar-la en un túnel de vent per tal de verificar els resultats obtinguts en les simulacions amb la dinàmica computacional de fluids. Un túnel de vent incorpora un ventilador de grans dimensions per tal d'accelerar el fluid que impactarà amb el model d'estudi i un altre ventilador per tal de recircular el flux en la cambra d'assaig. Aquests ventiladors funcionen amb motors que consumeixen una gran quantitat d'energia elèctrica, arribant als 3 MWh en el cas del túnel de vent de Mercedes. Si convertim aquesta energia en kilograms de CO_2 emesos a l'atmosfera, obtenim que s'emeten 870,97 kg de CO_2 . Per tant, com en aquest projecte no s'ha fabricat cap maqueta i, consegüentment, no s'ha utilitzat un túnel de vent, es pot dir que s'ha evitat el gran impacte mediambiental que aquest comporta. També s'ha de tenir en compte que la cambra d'assaig d'un túnel de vent ha d'estar en unes determinades condicions ambientals, és per això que la sala ha de disposar d'un sistema de climatització.

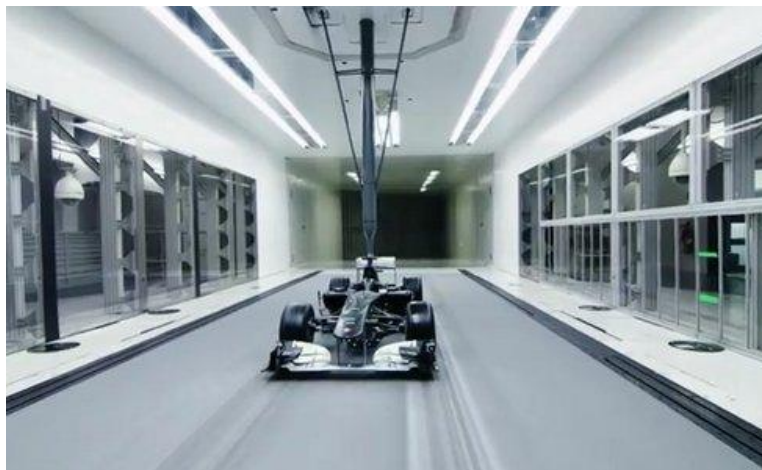


Figura 8.1: Exemple d'un túnel de vent.

Conclusions

En aquest apartat es presentaran les conclusions tècniques més rellevants.

En la primera simulació que s'ha realitzat s'ha pogut observar les diferències en els resultats numèrics obtinguts quan s'usava un mallat amb *Span Angle Center* a *Fine* i quan s'usava un mallat amb el *Span Angle Center* a *Medium*. S'ha considerat que la diferència en els resultats obtinguts era prou significativa com per realitzar la resta de simulacions amb el mallat més definit (S.A.C.: *Fine*). En aquesta simulació també s'ha pogut observar com el flux d'aire incident en el flap provocava un important vòrtex en la seva part posterior i per tant, feia augmentar la força de resistència a l'avanç.

En la següent simulació s'ha pogut comprovar com, a l'afegir l'*endplate* en el flap, el vòrtex provocat per aquest quedava dràsticament reduït. Aquest fet s'ha pogut corroborar en els resultats numèrics obtinguts, ja que tal com s'esperava, el C_D ha disminuït un 12,11%.

A partir de l'anterior model, s'ha anat variant l'angle d'atac del perfil alar de 0° a 10° i s'han analitzat els resultats obtinguts en cadascuna de les simulacions. Les conclusions més rellevants extretes d'aquestes simulacions queden recollides en els següents punts:

- Tal com s'esperava, el C_D i el C_L han anat augmentant a mesura que s'ha anat incrementant l'angle d'atac. El C_D ha augmentat un 121,55 % respecte del model amb l'angle d'atac a 0° , i el C_L ha augmentat un 113,06 %.
- La pressió en la part superior del perfil alar ha anat incrementant degut a l'augment de l'àrea frontal (A_D).
- La velocitat del flux d'aire circulant per la part inferior del perfil alar ha anat augmentant progressivament, i consegüentment, la pressió s'ha vist reduïda.
- L'estela de turbulències generada pel perfil alar ha estat més significativa a mesura que s'ha anat augmentant l'angle d'atac.

Degut al disseny de l'aleró, no s'ha pogut augmentar a més de 10° l'angle d'atac del perfil alar, ja que aquest topava amb el flap.

Com a conclusions generals, s'ha vist que l'angle d'atac òptim han estat els 5° , ja que ha estat el que ha maximitzat l'eficiència aerodinàmica del model. Aquest angle d'atac a proporcionat a l'aleró un C_L de -3,057, un C_D de 0,3806 i una eficiència aerodinàmica de 8,032.

Comentaris generals

En el transcurs d'aquest treball s'ha pogut prendre consideració de la importància de l'aerodinàmica en la Fórmula 1. També s'ha vist la quantitat de recursos que es gasten cada any a nivell de recerca i desenvolupament en les tecnologies de simulació, tals com el túnel de vent, element indispensable per corroborar els resultats obtinguts en el CFD.

En l'àmbit acadèmic es pot dir que s'han complert la majoria dels objectius plantejats a l'inici del treball. Primer de tot s'ha comprès el funcionament dels diferents elements aerodinàmics que incorpora un monoplaça de la F1, àmbit pel qual se sentia una gran curiositat. Per altra banda també s'han pogut aplicar els coneixements bàsics de la Mecànica de Fluids apresos durant el grau per tal d'entendre alguns dels conceptes aerodinàmics plantejats durant el treball.

Pel que fa als objectius de la part pràctica del treball, es pot afirmar que no s'han complert tots al 100%. El primer objectiu plantejat per aquesta part del treball va ser el de simular mitjançant *l'ANSYS Fluent* un aleró davanter real, però com només es disposava de la versió estudiantil d'aquest software, aquesta simulació no es va poder realitzar degut a la complexitat del seu mallat. Aquest problema va fer que s'hagués de dissenyar un aleró davanter des de zero, cosa que va resultar ser molt interessant.

Per una altra part, sí que es van complir els objectius de millorar l'eficiència aerodinàmica de l'aleró inicial mitjançant canvis en la seva geometria, i els resultats finals ho demostren, ja que s'ha aconseguit augmentar l'eficiència aerodinàmica de l'aleró en un 56,72%.

Per últim però no menys important, cal recalcar que a l'inici d'aquest treball no es tenien pràcticament coneixements sobre el funcionament del programa *ANSYS Fluent*, i que gràcies a aquest treball s'ha pogut aprofundir en gran mesura en la seva utilització i metodologia a l'hora de realitzar les simulacions.

Bibliografia

Les següents referències bibliogràfiques han estat utilitzades com a informació i ajuda per a la redacció i elaboració del treball:

Bibliografia material

- JOHN D. ANDERSON Jr., Fundamentals of aerodynamics.
- FRANK M. WHITE, *Mecánica de fluidos*, McGraw-Hill, 2005.
- MCBEATH, SIMON, *Aerodinámica del automóvil de competición*, Ediciones Ceac, 2005.
- Apunts presos en l'assignatura *Mecànica de Fluids* del 3er any de Grau.

Bibliografía digital

De cara a la redacció de la part teòrica, junt amb la bibliografia material mencionada, s'han utilitzat les següents referències digitals:

- 2016 FORMULA ONE TECHNICAL REGULATIONS (FIA) [PDF]
- <https://www.youtube.com/watch?v=OT0ynzPtoVE> (Vídeo capa límit)
- https://www.mpoweruk.com/figs/flight_theory.htm (Lift i drag)
- <http://avstop.com/ac/flighthtraininghandbook/forcesonanaairfoil.html> (Forces aerodinàmiques)
- http://www.f1scarlet.com/f1_beginners.html (Diverses dades tècniques)
- <https://tecnicaf1.wordpress.com/2011/12/08/elementos-aerodinamicos-de-un-formula-1/> (Informació general)
- <http://www.fia.com/regulations/regulation/drivers-equipment-98> (Regulacions FIA)
- https://www.formula1.com/content/fom-website/en/championship/inside-f1/rules-regs/Bodywork_and_dimensions_and_Cockpit.html (Dimensions reglamentàries)
- https://www.youtube.com/watch?v=jYaIXWNOa_A (Aerodinàmica en túnel de vent)
- http://www.encarreraweb.com.ar/datos_tecnicos/AERODINAMICA.pdf (Efecte sòl)
- <https://secretosf1.wordpress.com/2010/03/27/los-alerones-el-angulo-de-ataque/> (Angle d'atac)
- <http://www.monografias.com/trabajos-pdf5/bloque-aerodinamica-f1-in-schools/bloque-aerodinamica-f1-in-schools.shtml> (Parts del perfil alar)
- https://en.wikipedia.org/wiki/Gurney_flap (Flap de Gurney)
- <http://www.motor.es/formula-1/el-flap-gurney-sencillo-pero-muy-efectivo-201521169.html> (Flap de Gurney)

- <http://www.formulaf1.es/26257/comprendiendo-un-f1-parte-3/> (Aleró davanter)
- <http://www.motor.es/formula-1/el-aleron-delantero-201521005.html> (Aleró davanter)
- <http://camaroonf1.com/tecnicas/la-importancia-de-la-aerodinamica-en-la-f1-2da-parte-los-alerones/> (Aleró davanter i posterior)
- <http://atlasf1.autosport.com/2000/feb23/gray.html> (Aerodinàmica general de la F1)
- <https://www.youtube.com/watch?v=FELZp6MV2IA> (Vídeo sobre el Fons pla)
- <http://www.formulaf1.es/36459/comprendiendo-un-f1-parte-7/> (Fons pla)
- <http://www.formulaf1.es/38068/comprendiendo-un-f1-parte-8/> (Difusor)
- <http://formulauno-auto.blogspot.com.es/2010/10/fondo-plano.html> (Fons pla)
- <http://www.autobild.es/motorsport/tecnica-f1-que-es-efecto-suelo-258303> (Efecte sòl)
- <http://www.caranddriverthef1.com/formula1/noticias/2016/02/24/127140-la-comision-f1-confirma-nuevos-cambios-en-las-normas-chasis> (Normatives xassís)
- <http://eduardojosecar.blogspot.com.es/2014/01/que-hay-en-los-pontones-de-un-f1.html> (Pontons)
- <http://www.racecar-engineering.com/articles/f1/technology-explained-f1-airboxes-filters/> (Pontons)
- <https://pasoporcurva.wordpress.com/2008/01/20/tecnica-f1-deflectores-laterales/> (Deflectors laterals)
- <http://www.formulaf1.es/26257/comprendiendo-un-f1-parte-3/> (Aleró davanter)
- <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2006elounda2/papers/538-154.pdf> (informació general)

De cara a la part pràctica del treball consistent en les simulacions en CFD, s'han utilitzat les següents referències bibliogràfiques com a ajuda:

- **Tutorials d'auto aprenentatge sobre el funcionament d'ANSYS Fluent 16.2:** <http://www.youtube.com/>
- **Web amb informació referent a l'anàlisi CFD:** <http://www.cfd-online.com/>
- **[1] Manual ANSYS Fluent:** LANFRIT, MARCO. *Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT* [PDF]